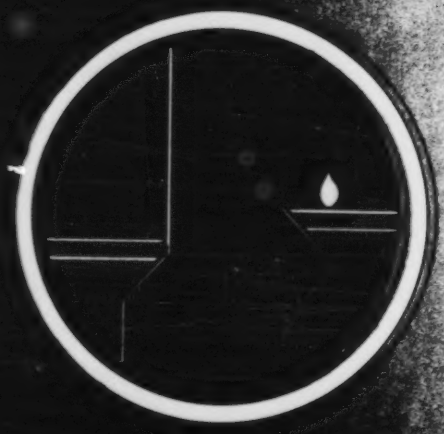
No. 85-7F

T DE
ET



ETUDE DES PROPRIETES ET DE LA RESISTANCE DE LIANTS A BASE DE CIMENT PORTLAND ET DE LAITIERS NON FERREUX

Canada

86-04128/

ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS ET DE LA RÉSISTANCE DE LIANTS À BASE DE CIMENT PORTLAND ET DE LAITIERS NON FERREUX

E. Douglas et V.M. Malhotra

Laboratoire de traitement des minéraux

LABORATOIRES DES SCIENCES MINÉRALES
RAPPORT de CANMET 85-7F

Mars 1985
42pp

©Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1986

En vente au Canada par l'entremise de nos

agents libraires agréés

et autres librairies

ou par la poste auprès du:

Centre d'édition du gouvernement du Canada
Approvisionnements et Services Canada
Ottawa (Canada) K1A 0S9

N° de catalogue M38-13/85-7F
ISBN 0-660-91746-7

au Canada: $4.25
à l'étranger: $5.10

Prix sujet à changement sans préavis

Available in English

ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS ET DE LA RÉSISTANCE DE LIANTS À BASE DE CIMENT PORTLAND ET DE LAITIERS NON FERREUX COMME LIANT DANS LE CIMENT PORTLAND

E. Douglas et V.M. Malhotra***

RÉSUMÉ

La présente étude est une analyse des derniers progrès réalisés au niveau de la recherche et des applications pratiques dans le domaine des laitiers de cuivre, de nickel et de plomb comme matériaux de remplacement partiel du ciment Portland dans les remblais agglomérés des mines et dans le béton. Les résultats de recherches récentes montrent que la teneur en verre et les propriétés pouzzolaniques du laitier non ferreux ne sont pas reliées directement entre elles et que la friabilité du laitier serait fonction du degré de vitrification. Les essais de résistance à la compression effectués sur des mortiers révèlent que les laitiers non ferreux refroidis à l'air peuvent donner un meilleur rendement que les laitiers granulés, selon le degré de finesse. Pendant l'hydratation, le laitier accélérerait la vitesse d'hydratation de C_3S mais il ne semble pas réagir immédiatement avec le $Ca(OH)_2$ libéré. Le laitier non ferreux semble offrir de grandes possibilités en tant que produit de remplacement partiel du ciment portland dans les remblais agglomérés des mines et, jusqu'à un certain point, dans le béton. Il faudra poursuivre les recherches afin de déterminer les secteurs qui pourraient se prêter à de nouvelles applications, ainsi que les limites à l'utilisation des laitiers non ferreux.

*Chercheur scientifique, Section des matériaux de construction, CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada, K1A 0G1.

**Chef, Section des matériaux de construction, CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada, K1A 0G1.

A REVIEW OF THE PROPERTIES AND STRENGTH DEVELOPMENT OF NON-FERROUS SLAGS-PORTLAND CEMENT BINDERS

E. Douglas and V.M. Malhotra***

SYNOPSIS

This study presents a state-of-the-art review of the advances in research and in practical applications of copper, nickel, and lead slags as partial portland-cement replacement in cemented mine backfill and in concrete. Recent research shows that glass content and pozzolanic properties of non-ferrous slags are not directly related and that grindability of the slags seems to be a function of the degree of vitrification. Compressive strength tests on mortars show that air-cooled, non-ferrous slags can outperform granulated slags, depending on the fineness. During hydration, the slags seem to accelerate the rate of C_3S hydration but do not seem to react immediately with the $Ca(OH)_2$ liberated. Non-ferrous slags appear to have considerable potential for partial portland-cement replacement in cemented mine backfill and, to a degree, in concrete. Research is needed to define the areas of additional applications, as well as limitations, to the use of non-ferrous slags.

*Research Scientist, Construction Materials Section, CANMET, Energy Mines and Resources Canada, K1A 0G1.

**Head, Construction Materials Section, CANMET, Energy Mines and Resources Canada, K1A 0G1.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ iii
SYNOPSIS v
INTRODUCTION 1
NATURE DES LAITIERS NON FERREUX 2
Composition chimique 2
Teneur en verre 2
PROPRIÉTÉS DES LAITIERS NON FERREUX 2
Friabilité 2
Activité pouzzolanique 3
Effet de la teneur en verre sur l'activité pouzzolanique 4
Effet de la finesse sur l'activité pouzzolanique 4
HYDRATATION DES LAITIERS NON FERREUX 4
RÉSISTANCE DES REMBLAIS DE MINES, RENFERMANT DES LAITIERS NON FERREUX 5
RÉSISTANCE DE MORTIERS ET DE BÉTONS RENFERMANT DES LAITIERS NON FERREUX 6
Effet de la teneur en verre sur la résistance 7
Effet de la finesse sur la résistance 7
Effet de la teneur en laitier sur la résistance 7
Effet des activateurs sur la résistance 8
DURABILITÉ DES MORTIERS RENFERMANT DES LAITIERS NON FERREUX 8
REMARQUES FINALES 9
Recherches proposées 9
RÉFÉRENCES 10

TABLEAUX

1. Analyse chimique de laitiers canadiens non ferreux 15
2. Composition brute de laitiers canadiens non ferreux 15
3. Constituants de laitier de cuivre, par analyse de l'image 15
4. Composition du verre déterminée par microsonde électronique dans des laitiers de cuivre 15
5. Énergie estimative en kWh/t nécessaire pour broyer un laitier de nickel, calculée à partir des temps de broyage 15
6. Répartition granulométrique dans un laitier de nickel granulé, broyé à 3000 cm^2/g 16
7. Distribution granulométrique, aire surfacique et densité de laitiers de nickel broyés, analysés pour leur activité pouzzolanique 16
8. Consommation d'énergie pour le broyage des laitiers non ferreux 16
9. Besoins en énergie pour le broyage et composition de laitiers non ferreux 17
10. Indice d'activité du laitier pour des laitiers non ferreux, durcis dans une chambre humide à 23°C, avec remplacement en volume absolu de 50 % du ciment portland 17
11. Composition chimique de laitiers de nickel, refroidis à l'air et trempés à l'eau 18
12. Composition des spécimens renfermant des laitiers de nickel, refroidis à l'air et trempés à l'eau 18
13. Indices d'activité pouzzolanique et d'activité de laitier pour des mortiers de laitier-ciment portland, durcis à la température de la pièce 18
14. Indices pouzzolanique et hydraulique de laitiers canadiens non ferreux 19
15. Résistance relative de mortiers de ciment portland et de laitier de nickel, montrant l'effet de la finesse 19
16. Résistance à la compression uniaxiale d'un laitier de cuivre broyé de four à réverbère et de pâtes de $Ca(OH)_2$ 19
17. Effet de la masse volumique et de la teneur en eau sur la résistance initiale à la compression d'un remblai 19
18. Mélanges pour résidus de mine agglomérés et évolution de la résistance à la compression 20
19. Mélanges pour remblai de roches agglomérées, et évolution de la résistance à la compression du remblai 20
20. Résistance à la compression, après 28 jours, de cubes de mortier durcis à 38°C, avec remplacement en volume absolu de 20, 35, 50 et 70 % de ciment portland par du laitier 21
21. Résistance à la compression, à 23°C, de cubes de mortier, avec remplacement en volume absolu de 50 % du ciment portland par du laitier 22

22. Gradations des agrégats grossiers et fins pour les mélanges de béton 22
23. Évolution de la résistance à la compression de mélanges à béton, renfermant 50 % de laitiers non ferreux broyés, incorporés par remplacement en volume absolu de ciment portland de type 10, avec addition réductrice d'eau 23
24. Évolution de la résistance à la compression de mélange à béton, renfermant 50 % de laitiers non ferreux broyés, incorporés par remplacement en volume absolu de ciment portland de type 10, avec addition réductrice d'eau 24

FIGURES

1. Production, situation géographique et utilisation de laitiers non ferreux provenant de sources canadiennes 27
2a. Représentation de certains matériaux liants dans le système CaO-SiO_2-Al_2O_3 28
2b. Représentation de certains matériaux liants dans le système CaO-SiO_2-Fe_2O_3 28
3. Consommation d'énergie pour le broyage industriel de laitiers non ferreux 28
4. Courbe de durcissement montrant l'amélioration de la résistance grâce au laitier de cuivre broyé de four à réverbère, possédant une activité pouzzolanique à différentes teneurs en ciment 29
5. Courbes de durcissement à 1, 2, 3 et 4 % en poids de ciment portland et pour diverses additions de laitier de cuivre de four à réverbère, comme l'indique chaque courbe 30
6. Effet d'un laitier granulé broyé sur la résistance à la compression uniaxiale d'un remblai consolidé renfermant 6 % de ciment portland 31
7. Évolution de la résistance à la compression à 23°C de mortier durci en présence d'humidité renfermant 50 % de laitier par remplacement de volume absolu du ciment portland 31
8. Résistance à la compression de mortier de ciment portland et de laitier de cuivre après 28 jours de durcissement 32
9. Résistance à la compression de mortier de ciment portland et de laitier de nickel après 28 jours de durcissement 32
10. Résistance à la compression de mortiers de ciment portland et de laitiers de plomb après 28 jours de durcissement 33
11. Variation de la résistance après différents temps de prise, calculés grâce à des spécimens normaux à 4.8 % en poids de ciment portland, durcis pendant le même temps lors d'essais pouzzolaniques à divers taux de remplacement du ciment 33
12. Indice hydraulique de laitiers de nickel, refroidis à l'air et granulés, avec différents degrés de finesse 34
13. Résistance à la compression de liants de laitier de plomb et de ciment portland de type III, pour divers taux de remplacement du ciment 34
14. Évolution de la résistance dans des mortiers de ciment portland et de laitiers de cuivre, durcis à la température de la pièce 35
15. Résistance à la compression de mélange à béton 36
16. Rapports des résistances à la compression de mélanges à béton 36
17. Évolution de la résistance de mortiers de ciment portland et de laitier de cuivre, durcis à la température de la pièce 37
18. Effet de la finesse sur la résistance à la compression de liants constitués de 70 % en poids de ciment portland et de 30 % en poids de laitiers de nickel refroidis à l'air 38
19. Effet de la teneur en laitiers des liants sur la résistance à la compression de cubes de mortiers 38
20. Relation entre l'eau combinée et la résistance à la compression 38
21. Effet d'activateurs sur la résistance à la compression de laitiers de nickel refroidis à l'air et granulés, broyés à divers degrés de finesse 39

INTRODUCTION

Les résidus générés par les opérations minières et les procédés métallurgiques renferment des métaux et des minéraux qui sont récupérables. On s'intéresse de plus en plus à ces résidus pour les raisons suivantes: intensification des activités d'exploration et d'enrichissement des minéraux; augmentation du coût de l'élimination des résidus; épuisement des gisement miniers à teneur élevée et bien situés géographiquement; réglementation restreignant les opérations minières près de zones peuplées. Tous ces faits ont accéléré les études sur la faisabilité de la récupération de métaux et de minéraux à partir de minerais plus accessibles et de sources comme les résidus minéraux.

Généralement, la plupart des résidus minéraux qui ne sont pas déversés dans les décharges, servent comme agents de remplissage, additifs pour les sols, agrégats, et ballast pour les chemins de fer. Il faut signaler particulièrement l'utilisation de résidus minéraux (comme les laitiers) pour remplacer le ciment portland dans les remblais agglomérés des mines et dans le béton, et le fait que les résidus minéraux sont des produits secondaires ayant nécessité une grande quantité d'énergie, qui est perdue lors de l'élimination (fig. 1). La vitrification et le broyage des résidus ferreux comme le laitier de hauts fourneaux, donnent un matériau qui peut être ajouté au mélangeur comme produit de remplacement du ciment portland dans la fabrication du béton (1).

Au Canada, la production de laitier vitreux (granulé) par les hauts fourneaux pour la fonte à Hamilton (Ontario) est de $2{,}2 \times 10^5$ tonnes métriques par an. À Sault-Sainte-Marie (Ontario), une usine en construction produira annuellement 200 000 tonnes métriques de laitier granulé de haut fourneau à l'aciérie d'Algoma. Environ 45 % du laitier de haut fourneau produit à Hamilton sert à la fabrication de béton (2).

Les techniques d'utilisation de laitiers ferreux granulés comme matériaux liants ont été mises au point en Europe et en Amérique du Nord; mais, l'emploi de laitiers non ferreux comme liants pour la fabrication du béton n'est pas encore parfaitement maîtrisé (3,4). En Australie, on utilise couramment des laitiers de cuivre pour les remblais agglomérés de mines; environ 50 % du ciment portland employé pour les remblais des mines de Mount Isa (Queensland) a été remplacé par un laitier granulé de cuivre broyé, ce qui a baissé le coût de production (3).

En Europe, en Australie et au Canada, certains laitiers de cuivre, nickel et plomb, ont été évalués quant à leur rendement comme liants dans des remblais de mines (4,5,6) et dans le béton (7,8). Environ $4{,}1 \times 10^6$ tonnes métriques de laitiers non ferreux sont produits annuellement au Canada, et une fraction très faible de ce montant est utilisée comme ballast pour les chemins de fer et comme charges techniques. Actuellement, l'accumulation est approximativement de 17×10^6 tonnes métriques.

Les laitiers ferreux sont des produits secondaires siliceux ou alimino-siliceux des procédés métallurgiques. Ces laitiers n'ont que peu ou pas du tout de propriétés liantes, mais à l'état finement divisé, et en présence d'humidité, ils réagissent avec les hydroxyde* de métaux alcalins et alcalino-terreux, à température ordinaire, pour former des composés ayant les caractéristiques des ciments (9). Il en est de même des laitiers non ferreux qui peuvent, dans les mêmes conditions, acquérir des propriétés liantes.

Les laitiers de cuivre et de nickel sont extraits à partir de concentrés de sulfure par traitement pyrométallurgique. Le procédé comprend trois opérations différentes:

- **le grillage**, dans lequel le soufre est éliminé sous forme de SO_2, le fer étant oxydé;
- **la fusion**, dans laquelle le produit du grillage est fondu avec un fondant siliceux, ce qui donne un laitier de silicate de fer liquide flottant sur la masse de sulfure fondue plus lourde;
- **la conversion**, dans laquelle le soufre est expulsé de la masse de sulfure fondue, et où le reste du fer est oxydé et fondu pour être éliminé comme laitier de silicate.

Le laitier du convertisseur est généralement renvoyé au four de fusion, car il est riche en métal; le laitier du four est soit jeté sans traitement ultérieur, soit granulé avec un excès d'eau. Ces laitiers possèdent un haut niveau de dureté et de porosité; leur densité et leur composition chimique sont variables en raison de différences découlant du type de minerai, de l'opération de grillage et de fusion, et enfin du procédé de refroidissement du laitier.

La présente étude est une analyse des progrès les plus récents en recherches et en applications pratiques dans le domaine des laitiers de cuivre, nickel et plomb. Nous espérons qu'il permettra d'orienter les recherches futures vers l'utilisation de quantités importantes de ce matériau prometteur.

---

*Il s'agit de NaOH, KOH, et $Ca(OH)_2$.

NATURE DES LAITIERS NON FERREUX

COMPOSITION CHIMIQUE

En dépit de différences au niveau des procédés, les laitiers ont une composition chimique semblable, tous pouvant être classés dans le système $CaO\text{-}SiO_2\text{-}Fe_2O_3$ (fig. 2).

La composition globale de certains laitiers canadiens est illustrée au tableau 1 (10). Une étude récente des diverses analyses de laitiers non ferreux canadiens (tableau 2) montre que la composition chimique globale, déterminée à l'aide d'une micro-sonde à électrons, fonctionnant sous une tension d'accélération de 15 kV, diffère légèrement de la composition chimique obtenue par les méthodes analytiques (11).

TENEUR EN VERRE

Des données ont été publiées par McGuire (12) sur la teneur en verre de laitiers non ferreux de sources canadiennes, comme par exemple un laitier de nickel-cuivre d'un four électrique, granulé par trempe rapide. La teneur en verre mesurée par diffraction des rayons X était de 95 % (13). Le laitier était trop opaque pour permettre un comptage fiable du verre par la méthode optique avec lumière polarisante, semblable à la méthode utilisée pour le contrôle de la qualité du laitier de haut fourneau pour la fonte (14).

Un rapport de Douglas et al. (15) parle des mesures de la teneur en verre à l'aide du microscope électronique à balayage (MEB) et par analyse de l'image, dans le cadre d'une étude sur l'hydratation et l'activité pouzzolanique de laitiers de cuivre de four* à réverbère, obtenus par trempe et par refroidissement à la température ambiante, provenant du nord du Québec (tableau 3). La teneur en verre du laitier refroidi à l'air était de 45 %; le laitier refroidi par trempe en renfermait de 75 à 95 %. La composition du verre était également donnée (tableau 4), montrant la différence de teneur en verre entre le laitier refroidi à l'air et le laitier de trempe, différence due à la séparation de Al_2O_3, SiO_2, K_2O et CaO pendant la trempe. Les résultats ne concordaient pas avec ceux publiés par Roper et al (16), qui estimaient à environ 1:1 le rapport entre la phase amorphe et la phase cristalline dans le laitier de cuivre du four à réverbère obtenu par trempe.

PROPRIÉTÉS DES LAITIERS NON FERREUX

FRIABILITÉ

Les renseignements sont rares en ce qui concerne la friabilité, les besoins énergétiques pour le broyage, ainsi que la granulométrie des laitiers non ferreux broyés. Laneuville (5) donne la puissance estimative nécessaire pour broyer des laitiers de nickel, refroidis à l'air et granulés, à divers degrés de finesse, selon la durée du broyage (tableau 5).

La granulométrie d'un laitier de nickel-cuivre de four électrique, broyé à une surface spécifique de 3 000 cm^2/g, figure dans un rapport de McGuire (12) et est illustrée au tableau 6. Le tableau 7 (17) présente la granulométrie de laitiers de nickel broyés, provenant de Copper Cliff (Ontario), et analysés pour leur activité pouzzolanique.

Plus récemment, Douglas et al. (10), dans le cadre d'une étude de la friabilité d'un certain nombre de laitiers canadiens de cuivre, nickel et plomb, ont comparé celle-ci à la friabilité d'un laitier de ciment portland contenant 3 % de gypse. Aux fins d'étalonnage du temps de broyage et de la consommation en énergie, on a considéré que le broyage du laitier de ciment portland avec 3 % de gypse demandait 31 kWh/t pour l'obtention d'une surface spécifique de 3 000 cm^2/g, et 43 kWh/t pour une surface spécifique de 4 000 cm^2/g. À partir de ces données, une équivalence de 1 min = 0,4 kWh/t a été retenue comme échelle pour passer de l'opération en laboratoire à l'opération en usine, échelle qui dépend évidemment des caractéristiques du laboratoire.

Le tableau 8 présente les résultats suivants pour le broyage: finesse recherchée; finesse réelle (méthode Blaine); temps nécessaire pour obtenir la finesse spécifique; consommation d'énergie pour l'obtention de matériaux de 2 000, 3 000, 4 000 et 5 000 cm^2/g; densité; pourcentages passant à 45 μm (10).

La figure 3 présente la consommation estimative d'énergie, nécessaire pour le broyage d'échantillons de laitier, comparativement à celle requise pour broyer un laitier de four à réverbère et un laitier de ciment portland après addition de gypse, à une surface spécifique de 4 000 cm^2/g. Le tableau 9 (10) présente par ordre croissant, l'énergie de broyage, une étude comparative par rapport à une taille initiale de moins de 75 μm, la composition en oxydes les plus importants, ainsi que le degré estimatif de vitrification.

*Un four à réverbère est un four dans lequel il y a fusion du concentré.

D'après les données obtenues, il semblerait que la friabilité des laitiers non ferreux soit fonction du degré de vitrification. Les laitiers à forte teneur en verre requièrent généralement un temps de broyage plus long.

ACTIVITÉ POUZZOLANIQUE

Les matériaux pouzzolaniques contiennent de la fine silice active, qui réagit avec la chaux et l'eau pour donner des silicates de calcium hydratés, stables, aux propriétés liantes. Pour les remblais de mines, à ciment hydraulique, les cendres volantes, le laitier de cuivre, broyé et trempé, de four à réverbère, ainsi que le laitier broyé de haut fourneau sont des matériaux qui possèdent une activité pouzzolanique prouvée (16). Selon Thomas (18), trois aspects doivent être considérés lors de l'utilisation de matériaux pouzzolaniques comme remblais de mines, à ciment hydraulique:

— les réactions entraînant la séparation de la chaux, matière qui peut avoir des effets dangereux;

— obtention d'un ciment plus résistant par suite de l'élimination de chaux, pour une teneur moindre en ciment portland;

— formation de matériaux liants supplémentaires à partir de la réaction pouzzolanique, ce qui donne une résistance équivalente pour une teneur moindre en ciment portland.

Ces faits ont été vérifiés expérimentalement par Thomas (3) lors d'une étude des propriétés pouzzolaniques d'un laitier granulé de cuivre d'un four à réverbère, qui n'avait pas été altéré de façon profonde après de nombreuses années de séjour dans un dépotoir en surface. L'analyse granulométrique révéla pratiquement la présence d'un seul constituant, d'un diamètre d'environ 2,54 mm. Des spécimens analytiques furent préparés à partir de mélanges de remblais broyés, de ciment portland, et du laitier broyé à une surface spécifique de 3 000 cm^2/g. La figure 4 montre l'accroissement de la résistance avec les additions de laitier, la teneur en ciment restant la même. Ces résultats, laissant supposer une diminution possible du coût des remblais agglomérés, sans perte de résistance, furent considérés comme significatifs.

Le même laitier fut soumis ultérieurement à des essais dans un remblai aggloméré de mine, à un rapport élevé laitier ciment (6). Le remblai contenait de 80 à 99 % en poids de résidus de sulfure de cuivre de la mine d'Isa, de 1 à 5 % en poids de ciment portland et de 0 à 16 % en poids de laitier (fig. 5). Thomas (6) en a conclu que les additions de laitier ne présentaient aucun avantage à 1 % en poids de ciment portland, qu'elles étaient toujours bénéfiques à 3 % et plus en poids de ciment portland, et qu'elles étaient plus ou moins avantageuses à 2 % en poids de ciment portland.

Des essais, portant sur l'activité pouzzolanique, avec un laitier de cuivre granulé, ont été effectués grâce à diverses méthodes en Espagne (4). Les résultats des essais conduits selon la méthode ASTM C 618-73, ont révélé qu'il y avait résistance au-dessus de 75 % en poids par rapport aux spécimens témoins.

Laneuville (5) a déterminé l'activité pouzzolanique de laitiers de nickel, refroidis à l'air ou granulés, par la méthode ASTM C 595, et il a observé qu'une résistance à la compression, supérieure au minimum de 800 psi établi par la norme, était obtenue lorsque ces laitiers étaient broyés à une surface spécifique se situant entre 3 800 et 4 000 cm^2/g.

Au Canada, un gain de résistance grâce à une teneur plus grande en laitier granulé de nickel-cuivre de four électrique, a été mesuré par McGuire (12) à l'aide de mélanges renfermant 6 % en poids de ciment portland et une charge de résidus d'une densité relative de 2,96 (fig. 6). Le gain en résistance était attribuable à la liaison chimique obtenue par hydratation d'un laitier pouzzolanique.

Plus récemment, l'indice pouzzolanique et l'indice d'activité d'un laitier ont été mesurés conformément à la méthode ASTM C 109* pour la préparation de spécimens destinés aux essais, et aux méthodes ASTM C 595** et C 989*** (10) pour les essais de prise et de contrôle.

Les essais ont été effectué à 7 et 28 jours selon la norme modifiée ASTM C 989, où 50 % du ciment portland mesuré en volume absolu a été remplacé par le laitier non ferreux broyé, ce qui faisait intervenir la densité différente du laitier (tableau 10).

La figure 7 révèle une évolution significative de la résistance, due à l'activité pouzzolanique. Les figures 8 à 10 montrent la résistance au 28e jour de prise à 38°C, pour des mortiers renfermant 20, 35, 50 et 70 % de laitier non ferreux broyé, remplaçant le ciment portland. Ni des activateurs comme NaOH, ni le remplacement du ciment portland par de la poussière de four à ciment, n'ont amélioré la résistance à la compression (10).

---

*ASTM C 109: résistance à la compression de mortiers pour ciment hydraulique, mesurée avec des spécimens cubiques de 50 mm.

**ASTM C 595: mesures de l'activité pouzzolanique et de l'indice d'activité du laitier, sur un ciment portland, avec des spécimens durcissant dans une chambre humide à 23°C pendant 24 h, et à 38°C dans des contenants scellés, après extraction du moule, pendant le reste du temps, jusqu'à 28 jours.

***ASTM C 989: mesures de l'activité du laitier avec du ciment portland. Les spécifications suivantes ont été introduites: (a) remplacement de 50 % du ciment portland par le laitier, en volume absolu et non en poids; (b) les spécimens ont été durcis à 23°C dans la chambre humide jusqu'à la date spécifiée.

Effet de la teneur en verre sur l'activité pouzzolanique

L'effet de la teneur en verre sur les propriétés pouzzolaniques de laitiers canadiens non ferreux peut être déterminé par comparaison des résistances obtenues avec des laitiers refroidis à l'air et d'autres trempés à l'eau (5,19).

Des mesures d'activité pouzzolanique pour les liants de remblais de mines ont été effectuées au Canada (20) à l'aide de laitiers de nickel et de cuivre-nickel, refroidis à l'air ou trempés, à différents taux de remplacement du ciment. Les tableaux 11 et 12 donnent la composition chimique des laitiers soumis aux essais, ainsi que les proportions du mélange de remblai aggloméré à partir duquel les spécimens ont été coulés.

La teneur en verre du laitier de nickel refroidi à l'air provenant du four à réverbère, était évaluée à moins de 20 %. La variation de la résistance à la compression a été calculée d'après un étalon renfermant 4,8 % en poids de ciment portland (figure 11). Les variations maximales de résistance ont été observées après 14 jours de prise, sur un échantillon renfermant 60 % de laitier de nickel refroidi à l'air. Phénomène inexplicable: un meilleur rendement a été obtenu par prise à long terme de spécimens d'un mélange renfermant un laitier de cuivre-nickel refroidi à l'air, comparativement au même laitier, mais avec trempe à l'eau. Le mélange contenait 4,8 % de ciment, 1,2 % de laitier et 96 % de résidus.

Les résultats d'études récentes sur l'activité pouzzolanique de laitiers canadiens non ferreux, refroidis à l'air ou trempés à l'eau (10,15), ont permis de conclure (contrairement aux résultats des études sur le laitier de haut fourneau) que, dans le cas des laitiers non ferreux, il n'y a pas de relation directe entre la teneur en verre et l'activité pouzzolanique. Des spécimens pour analyse de mortiers, avec remplacement de 35 et 70 % du ciment, ont été préparés conformément à la méthode ASTM C 595, mais durcis à la température de la pièce (15). Les résultats des études de l'activité pouzzolanique (tableau 13) montrent que les laitiers de cuivre refroidis à l'air peuvent, selon leur finesse, dépasser ou au moins égaler le rendement des laitiers de cuivre trempés à l'eau. Des résultats semblables ont été signalés pour des mesures d'activité pouzzolanique, effectuées sur des laitiers granulés de nickel, cuivre et plomb, conformément à la méthode ASTM C 595 (21). Le tableau 14 présente les indices d'activité pouzzolanique et d'activité du laitier.

Effet de la finesse sur l'activité pouzzolanique

Laneuville (5) a mesuré la résistance relative de mortiers préparés conformément à ASTM C 109, où 30 % du ciment était remplacé par un laitier de nickel refroidi à l'air, broyé à différents degrés de finesse. La résistance de spécimens pour essais fut comparée à celle d'un mortier de ciment portland, à diverses périodes de prise (tableau 15). Les résultats expérimentaux montrent une relation directe entre la résistance à la compression et la finesse. Laneuville (5) a également étudié l'effet de la finesse sur l'indice hydraulique à différentes périodes de prise (fig. 12).

Les résultats montrent que les laitiers granulés, broyés à 3 000 cm^2/g, étaient plus résistants que les laitiers refroidis à l'air, broyés à 4 000 cm^2/g. Mais, les laitiers refroidis à l'air, broyés à 7 000 cm^2/g, se révélaient plus résistants que les autres laitiers (tableau 15). Une étude plus récente révèle, comme l'illustrent les tableaux 13 et 14 (21), qu'il existe une relation directe entre l'activité pouzzolanique et la finesse dans le cas des laitiers canadiens de cuivre, nickel et plomb, aussi bien pour les échantillons refroidis à l'air que trempés.

HYDRATATION DES LAITIERS NON FERREUX

Chimiquement, les matériaux minéraux dérivent du système à plusieurs composantes suivant:

$$CaO\text{-}MgO\text{-}SiO_2\text{-}Al_2O_3\text{-}Fe_2O_3\text{-}SO_3$$

Le ciment portland, les pouzzolanes naturelles, la plupart des cendres volantes et beaucoup de laitiers de hauts fourneaux peuvent généralement être considérés comme un système ternaire simplifié $CaO\text{-}SiO_2\text{-}Al_2O_3$, avec des quantités mineures ou négligeables de MgO, SO_3 et Fe_2O_3 (fig. 2a). Les laitiers d'acier et les laitiers non ferreux sont mieux représentés par le système $CaO\text{-}SiO_2\text{-}Fe_2O_3$, où CaO représente la somme de CaO, MgO et Al_2O_3 (fig. 2b).

Environ 70 à 75 % en poids du laitier de ciment portland est du silicate tricalcique (C_3S) et du silicate β-dicalcique (β-C_2S) avec de petites quantités de Al_2O_3 et de MgO dissous dans les deux premiers composés (22). De plus, de faibles quantités de sulfate de calcium, généralement sous forme de gypse, sont ajoutées au laitier de ciment portland pendant le broyage pour régulariser la réaction initiale d'hydratation.

Les pouzzolanes naturelles d'origine volcanique sont composées d'une phase vitreuse à texture microporeuse, et de petites quantités d'une phase cristalline (23). La silice et l'alumine qui constituent la composante vitreuse pyroclastique, donnent, par combinaison avec la chaux en milieu aqueux, des produits liants insolubles. La réactivité des pouzzolanes n'est pas seulement fonction de la structure, de la morphologie et de la composition chimique de la phase vitreuse, mais également de la finesse du matériau (24), du type et de la

quantité de chaux du système (25,26) et de la teneur en eau (27).

Différents produits d'hydratation ont été caractérisés avec divers systèmes de pouzzolane-$Ca(OH)_2$. Dans certains cas, C-S-H avec C_2ASH_8, ou C-S-H, C_2ASH_8, hydrogrossulaire et ($C_3A.CaCO_3H_{12}$-C_4AH_{13}) ont été décelés, selon la composition de la pouzzolane. On pense que le rapport CaO/SiO_2 dans le C-S-H est étroitement lié à la concentration de Ca^{2+} dans la solution (28).

La composition des laitiers dépend de leur origine. L'analyse des laitiers de cuivre grâce au microscope électronique à balayage (MEB) a montré que ces matériaux étaient des enchevêtrements de fayalite, spinelle, verre et sulfures de cuivre. Les résultats d'études optiques, et par MEB, en Espagne (4), sur des laitiers de cuivre granulés ont révélé que la phase cristalline était principalement constituée de fayalite en forme d'aiguilles (Fe_2SiO_4) et d'oxydes de fer globulaires.

On connaît assez mal la composition des autres laitiers. Des matériaux aussi différents que le ciment portland, les pouzzolanes, les laitiers ferreux et non ferreux, devraient normalement réagir avec l'eau en donnant des composés distincts. Or, dans la pratique, il existe une similitude remarquable entre les produits de réaction provenant de ces matériaux. Le facteur commun dans tous ces systèmes est la formation ultime de C-S-H, qui correspond à l'apparition de liaisons structurales dans la masse hydratante.

Kam (29) a étudié l'hydratation d'un laitier de cuivre de four à réverbère, en présence de $Ca(OH)_2$, $CaCO_3$ et de ciment de portland. L'analyse expérimentale des produits d'hydratation comprenait la mesure de la chaleur initiale d'hydratation, le dosage de l'eau non évaporable dans les produits de réaction, ainsi que l'analyse quantitative par diffraction des rayons X et la microscopie électronique à balayage.

Kam indique que la vitesse de dégagement de chaleur diminue lorsque la proportion de laitier augmente. De plus, la quantité d'eau non évaporable augmente avec l'accroissement de la quantité de laitier dans la pâte. En outre, les études de Kam révèlent la présence d'un pic de diffraction non caractérisé à 7,34 Å sur les diffractogrammes de rayons X, pour tous les mélanges hydratés de laitier-$Ca(OH)_2$. La diffraction aux rayons X montre également que les cristaux de fayalite ne participent pas à la réaction d'hydratation. Ce type de réaction est limité à la phase vitreuse.

Roper et al. (16) signalent que le laitier de cuivre de four à réverbère n'a pas besoin d'être complètement vitreux pour qu'il y ait hydratration significative. Des travaux récents effectués par Douglas et al. (15), avec un laitier de cuivre refroidi à l'air et contenant 41 % de verre, et un laitier de cuivre trempé à l'eau et contenant 95 % de verre, prouvent que la présence du laitier retarde le transfert de Ca^{2+} à partir des constituants du ciment portland vers la solution au tout début de l'hydratation.

Dans la dernière étape, soit entre 24 et 72 heures d'hydratation, la concentration mesurée de Ca^{2+} dans les solutions en contact avec les liants et le pourcentage de $Ca(OH)_2$ dans la phase solide pour la même période, laissent supposer que davantage de C_3S provenant du ciment portland a réagi dans le mélange de laitier que dans le ciment portland. Il a aussi été démontré que les laitiers refroidis à l'air ont un meilleur rendement que les laitiers trempés à l'eau, selon leur finesse, mais d'autres recherches doivent être effectuées pour confirmer ces résultats.

RÉSISTANCE DES REMBLAIS DE MINES, RENFERMANT DES LAITIERS NON FERREUX

La plupart des recherches entreprises en faveur de l'utilisation des laitiers de cuivre, nickel et plomb ont consisté à explorer les possibilités de leur emploi comme produit de remplacement du ciment dans les remblais agglomérés de mines. C'est Thomas (3,6), en Australie, qui le premier a étudié la résistance de laitiers de cuivre de four à réverbère, de laitiers de plomb dézinsifiés de fonderie, et de laitiers de cuivre de convertisseur, dans des remblais agglomérés; les figures 4 et 5 présentent les résultats obtenus par Thomas.

Lors d'une étude récente (29), Kam a montré qu'une résistance significative pouvait être obtenue avec des mélanges de laitier-$Ca(OH)_2$ dans lesquels une teneur plus élevée en $Ca(OH)_2$ donnerait une résistance plus forte (tableau 16). Une résistance, équivalente à celle obtenue avec des mélanges de laitier-ciment portland, peut être réalisée dans le cas de remblais agglomérés, contenant des mélanges de laitier de cuivre de four à réverbère et de chaux (29). La résistance initiale du remblai est principalement fonction de la masse volumique et de la teneur en eau (tableau 17), paramètres qui dépendent des conditions de consolidation.

À un âge plus avancé, la résistance est fonction de la quantité de matériaux liants hydratés, présents dans le mélange. Un meilleur tassement du remblai dans les chambres devrait permettre d'obtenir une résistance élevée dès le départ. Selon Kam (29), le tassement pourrait être amélioré par drainage rapide du remblai humide pendant sa mise en place, et les techniques de vibration devraient également être expérimentées. Un changement dans la composition des matériaux de remblai, comme le rejet de chaux, peut améliorer la répartition granulométrique et, par conséquent, le tassement des matériaux du remblai.

Une récente étude par Emery (21) décrit des essais à 7, 28 et 90 jours avec un laitier de cuivre granulé provenant de l'Ontario, et un laitier de cuivre refondu et trempé à l'eau provenant du Québec, en mélange avec des résidus de mine (tableaux 18 et 19). Les mesures furent effectuées sur des cubes de 50 mm, non tassés, renfermant 70 % de résidus miniers. Après obtention d'une résistance suffisante et démoulage, les cubes furent entreposés dans une chambre humide à 23°C; après 28 jours, on mesura la résistance à la compression des spécimens. Les résultats montrent qu'il n'y a pas eu amélioration nette de la résistance dans les systèmes à 12 % en poids de laitier et 4 % de ciment portland, comparativement au mélange de 4 % de laitier et 4 % de ciment portland.

Entre 28 et 90 jours, on a noté une diminution de la résistance à la compression. Dans ce cas, il semble que les propriétés liantes soient surtout dues au ciment portland, et que la résistance moindre à la compression après 90 jours pourrait s'expliquer par les réactions chimiques des constituants présents dans les résidus lors du durcissement. Il est douteux qu'on tienne compte de ce phénomène dans les applications réelles.

RÉSISTANCE DE MORTIERS ET DE BÉTONS RENFERMANT DES LAITIERS NON FERREUX

Laneuville (5) et Baragano (4) ont étudié la résistance de mortiers à base de liants de laitiers non ferreux, soit de laitiers de nickel et de cuivre. Des rapports de recherches ont été publiés récemment (7), traitant de l'utilisation de laitiers de plomb comme produit de remplacement du ciment portland dans des blocs durcis à la vapeur. Les spéciments ont été préparés à partir de laitiers de plomb broyés et de matériaux renfermant du calcium comme la chaux, le gypse ou le ciment portland. On a préparé des mélanges renfermant trois parties de sable et 1 partie d'un liant constitué de différentes combinaisons de ciment portland ASTM Type III et d'un laitier de plomb broyé à 2 500 cm^2/g. Les résultats ont montré que jusqu'à 25 % en poids du ciment pouvaient être remplacés par le laitier broyé, avant qu'il n'y ait baisse sensible de la résistance (fig. 13).

Certains rapports donnent les résultats d'essais de résistance, effectués sur des mortiers, dont quelques-uns renfermaient des laitiers de plomb, nickel et cuivre, refroidis à l'air, granulés, ou trempés à l'eau, provenant de sources canadiennes; les données relatives à ces essais figurent au tableau 18 (21). Le ciment portland dans le mortier a été remplacé par le laitier. Les mortiers ont été durcis à 38°C pendant 28 jours. La résistance était plus élevée pour les laitiers de nickel refroidis à l'air que pour ceux trempés à l'eau. La résistance du laitier granulé de cuivre provenant de l'Ontario a été légèrement améliorée par addition de 20 % de CaO au laitier fondu, et par trempe dans un excès d'eau.

Des recherches par Emery (21) montrent qu'avec certains spécimens le laitier de cuivre refroidi à l'air, d'un four à réverbère, provenant de la province de Québec, donnait une meilleure résistance que le laitier trempé à l'eau provenant de la même source et possédant la même finesse; le tableau 20 présente une partie des résultats. Une autre série d'essais a porté sur des mortiers dans lesquels 50 % du ciment portland avaient été remplacés par le laitier (21). On laissa durcir les mortiers à la température de la pièce (23°C), les essais étant effectués à 1, 7, 28 et 90 jours (tableau 21). Les résultats révèlent que plusieurs laitiers semblent pouvoir remplacer le ciment portland pour une valeur de 4 000 au perméabilimètre (Blaine).

Douglas et Mainwaring (15) ont effectué des essais de résistance avec des mortiers de ciment portland et de laitiers de cuivre, à raison de 35 et 70 % de remplacement du ciment. Les mortiers ont été introduits dans des contenants, entreposés à 23 ± 1,7°C, et analysés à 1, 7, 28 et 90 jours (fig. 14a,b).

La résistance à la compression du mortier renfermant 35 % du laitier refroidi à l'air et broyé à 4 000 cm^2/g (méthode Blaine) était plus élevée que celle du mortier contenant 35 % du laitier trempé à l'eau, et de même finesse. À 90 jours, la résistance du premier avait atteint celle du mortier de ciment portland servant de témoin. Dans les mortiers à 70 % de remplacement, ceux renfermant les laitiers trempés à l'eau étaient plus résistants que les mortiers avec laitier refroidi à l'air.

D'autres études récentes avec des laitiers canadiens non ferreux ont montré que certains laitiers broyés à 4 000 cm^2/g donnaient de meilleurs résultats que les matériaux correspondants broyés à 3 000 cm^2/g. Mais, il faut noter que beaucoup des matériaux broyés à 3 000 cm^2/g sont suffisamment réactifs pour permettre d'éviter les coûts de broyage supplémentaires (11).

Certains rapports (21) donnent les détails d'une étude récente portant sur des mélanges de béton à base de laitiers canadiens broyés, non ferreux; les tableaux 22, 23 et 24 présentent l'évolution de leur résistance à la compression. Le tableau 24 montre l'effet d'une addition réduisant la quantité d'eau sur la résistance à la compression à différentes périodes. Les tableaux 23 et 24 comparent les mélanges de béton contenant des laitiers broyés non ferreux, quant à leur résistance à la compression à 7, 28 et 90 jours, ainsi qu'au rapport de la résistance à la compression relativement à un témoin, aux mêmes périodes.

La figure 15 présente l'évolution de la résistance à la compression, et la figure 16 le rapport des résistances à la compression. Il apparaît avec évidence que la résistance à la compression des mélanges de béton contenant du laitier de plomb est équivalente à 90 jours à la résistance à la compression du témoin à 28 jours.

EFFET DE LA TENEUR EN VERRE SUR LA RÉSISTANCE

On ne possède que peu d'information sur la relation entre la teneur en verre et l'évolution de la résistance en fonction du temps pour des bétons de ciment portland contenant du laitier non ferreux. Les résultats de l'évolution de la résistance de liants à base de laitiers non ferreux, refroidis à l'air ou trempés à l'eau, figurent dans la description d'un brevet canadien (5). Des mortiers constitués de ciment-laitier dans un rapport 70:30 ont été analysés pour leur résistance à la compression (ASTM C 109). Les laitiers étaient à base de nickel; le laitier refroidi à l'air a été broyé à 4 000 cm^2/g, et le laitier granulé à 3 800 cm^2/g. Les résultats après 90 jours de durcissement montrent que la trempe à l'eau améliorait la résistance à long terme des liants vitreux à base de laitier de nickel.

Douglas et coll. (30) donnent les résultats d'essais de résistance avec des mortiers (ASTM C 109) contenant des laitiers de plomb, nickel et cuivre, refroidis à l'air, granulés ou trempés à l'eau, provenant de sources canadiennes. Pour chaque essai, une quantité différente de ciment portland fut remplacée dans le mortier par le laitier. On laissa durcir le mortier à 38°C pendant 28 jours. Les laitiers de cuivre refroidis à l'air ont donné une résistance plus élevée que ceux trempés à l'eau (fig. 14). La résistance des laitiers de cuivre granulés provenant de l'Ontario a été légèrement améliorée par addition de 20 % de CaO au laitier fondu, et par trempe dans un excès d'eau. Pour certains des spécimens, le laitier de cuivre refroidi à l'air, du four à réverbère, provenant du Québec, communiquait une résistance plus élevée que le laitier plus vitreux et trempé à l'eau, provenant de la même source.

Une autre série d'essais a été effectuée avec des mortiers (ASTM C 109) dans lesquels 50 % du ciment portland avait été remplacé par le laitier (31). On a laissé les mortiers durcir à la température de la pièce (23°C), avec analyse après 1, 7, 28 et 90 jours (tableau 21). Les résultats montrent que certains laitiers broyés à 4 000 cm^2/g donnaient de meilleurs résultats après 90 jours que les spécimens témoins.

Douglas et Mainwaring (15) ont récemment présenté les résultats d'essais de résistance de mortiers constitués de liants à base de ciment et de laitier de cuivre, à 35 et 70 % de remplacement du ciment. Les cubes de mortier (ASTM C 595) ont été analysés après 1, 7, 28 et 90 jours (fig. 17). La résistance à la compression du mortier contenant 35 % de laitier refroidi à l'air et broyé à 4 000 cm^2/g (méthode Blaine) était plus élevée que celle d'un mortier renfermant 35 % du laitier trempé à l'eau, plus vitreux. Après 90 jours, la résistance du premier avait atteint celle du mortier de ciment portland utilisée comme témoin.

EFFET DE LA FINESSE SUR LA RÉSISTANCE

La meilleure résistance des laitiers granulés, plus fins, de hauts fourneaux, comme en font foi certains documents (32), a conduit quelques chercheurs à étudier l'effet de la finesse sur la résistance de liants à base de laitier de nickel (5). Les valeurs de résistance à la compression ont été obtenus pour des mortiers (ASTM C 109) contenant 70 % de ciment portland et 30 % de laitier de nickel refroidi à l'air. On a laissé les mortiers durcir dans l'eau à 23°C. Une augmentation d'environ 15 % de la résistance à la compression après 90 jours a été observée chez les spécimens constitués de laitiers broyés à 4 000 cm^2/g, comparativement aux laitiers broyés à 3 000 cm^2/g.

Ont également été publiés les résultats obtenus avec des mortiers constitués d'un laitier de nickel refroidi à l'air, de composition chimique semblable, mais renfermant 2 % de plus de MgO que le premier échantillon (5). L'évolution de la résistance des deux laitiers refroidis à l'air était à peu près comparable pour un broyage à 4 000 cm^2/g. Un broyage à 7 700 cm^2/g a résulté en une augmentation d'environ 15 % de la résistance à la compression après 90 jours. La figure 18 (5) présente l'évolution de la résistance de mortiers renfermant des laitiers de nickel refroidis à l'air, broyés à divers degrés de finesse, et durcis à 23°C. Des rapports publiés au Canada (tableau 21) (29) présentent les résistances à la compression après 28 jours pour des mortiers renfermant des laitiers de plomb, nickel ou cuivre broyés à 2 000, 3 000, 4 000 et 5 000 cm^2/g.

EFFET DE LA TENEUR EN LAITIER SUR LA RÉSISTANCE

Des résultats apparemment divergents ont été signalés en ce qui concerne l'effet de la teneur en laitier sur la résistance de liants à base de laitier de nickel. Thomas (33) a constaté une meilleure résistance dans le cas de mélanges de résidus de mines avec une quantité de laitiers de cuivre double de celle de ciment portland.

Laneuville (34) signalait la contribution négligeable d'un laitier de nickel granulé à la résistance initiale, cette contribution augmentant progressivement après 90 jours de durcissement à l'état humide et à 21°C, dans le cas de liants contenant moins de 45 % de laitier (fig. 19).

La divergence entre les deux séries de résultats, soit ceux de Thomas et ceux de Laneuville, s'explique, selon Laneuville, par le rapport décroissant eau/matériaux liants lorsqu'une quantité croissante de laitier est ajoutée à un montant fixe de ciment portland. L'analyse

de l'eau combinée dans les mortiers de liants de laitier a révélé une relation directe entre la résistance à la compression et l'eau combinée (fig. 20).

EFFET DES ACTIVATEURS SUR LA RÉSISTANCE

Les faibles valeurs de résistance initiale à la compression, obtenues avec des mortiers renfermant du ciment portland et un laitier de cuivre dans un rapport 65:35, ont conduit des chercheurs à étudier l'effet d'activateurs alcalins sur la résistance initiale (4). Atwell (1) signale qu'après addition de 5 à 10 % de poussière de précipitateur, renfermant environ 5 % d'un oxyde de métal alcalin, à des mortiers constitués de mélanges de ciment portland et de laitier de cuivre, il y avait jusqu'à 25 % d'augmentation de la résistance à la compression après 7 jours.

L'effet du carbonate de calcium et du chlorure de calcium sur des laitiers de nickel, refroidis à l'air ou granulés, a été étudié par Laneuville (5) avec des mortiers dont 30 % du ciment portland avait été remplacé par le laitier. Il en est arrivé à la conclusion que la résistance à la compression de mortiers de laitier de nickel ne se trouvait pas améliorée par accroissement de leur basicité.

L'activation à l'aide de chlorure de calcium s'est révélée efficace en améliorant la résistance de laitiers refroidis à l'air après 7 jours de durcissement (fig. 21). Les résultats montrent une amélioration de la résistance à tout âge, dans le cas de laitiers granulés, après addition de 2 % de chlorure de calcium.

Laneuville (5) a mesuré l'efficacité de la poussière de précipitateur, utilisée comme activateur. La poussière de four renfermait 16,8 % d'oxyde de potassium et 9,5 % d'oxyde de calcium libre. Il en a conclu que l'addition de poussière d'un précipitateur de four à ciment à des liants de ciment portland et de laitier de nickel augmentait la résistance initiale de ceux-ci, les propriétés étant alors comparables à celles des mortiers de ciment portland.

Mais, d'autres études récentes montrent que l'activation des laitiers de plomb, nickel et cuivre par addition de Na(OH) à l'eau de mélange, à une concentration de 200 g/L, ou par remplacement du ciment portland par la poussière de four à ciment, ne donnait pas des résultats très satisfaisants (10).

DURABILITÉ DES MORTIERS RENFERMANT DES LAITIERS NON FERREUX

On ne connaît pas le rendement du béton dont une partie du ciment a été remplacée par des laitiers non ferreux possédant des propriétés pouzzolaniques. Baragano (4) présente les résultats d'essais avec des mortiers, pour la mesure de la capacité protectrice contre la corrosion dans le cas du renforcement de l'acier. De bons résultats ont été obtenus pour des mélanges de ciment et de laitier de cuivre avec addition de chlorure de calcium comme activateur.

Baragano (4) présente également les résultats d'essais de résistance à l'attaque par les sulfates, de mortiers constitués de mélanges de ciment portland et de laitier de cuivre. Comme agents corrosifs, on a utilisé des solutions de sulfate de calcium, magnésium et sodium, ainsi que de l'eau de mer. La résistance la plus élevée a été observée avec un ciment de laitier renfermant 35 % de laitier de cuivre, comparativement à un mortier de ciment portland, ou de ciment portland avec 35 % de pouzzolanes naturelles. De même, les essais de gel et de dégel avec des mortiers révèlent de meilleurs résultats dans le cas du laitier de cuivre qu'avec les pouzzolanes naturelles.

REMARQUES FINALES

1. Les laitiers non ferreux semblent offrir des possibilités très intéressantes pour le remplacement partiel du ciment portland dans les remblais de mines et dans le béton.

2. D'autres recherches s'imposent pour bien définir les domaines d'application, ainsi que les limites d'utilisation des laitiers non ferreux.

RECHERCHES PROPOSÉES

Un programme de recherches portant sur l'utilisation des laitiers non ferreux dans les remblais de mines et dans le béton devrait comprendre ce qui suit:

1. élaboration de normes pour le contrôle de qualité;
2. mise au point de méthodes pour déceler tout danger causé par le lessivage d'éléments nocifs, pouvant menacer la santé;
3. mise au point d'essais pour mesurer la résistance du béton à des agents externes.

RÉFÉRENCES

1. Atwell, J.S. "Some properties of ground granulated slag"; *Proc Inst Civ Eng* 57:12; 1974.

2. Douglas, E. "Canadian ferrous and non-ferrous slags for resource and energy conservation"; *Rapport de division* ERP/MSL 83-61(TR); CANMET, Energy, Mines et Resources Canada; 1983.

3. Thomas, E.G. "Cemented fill practice and research at Mount Isa"; *Proc Aust Inst Min Met* 240; 1971.

4. Baragano, J.R. et Rey, P. "Estudio de una puzzolana no tradicional: escoria de cobre"; *Asland*; Division de Tecnologia y Servicio; Informe No. 977; 1980.

5. Laneuville, J. "Portland cement-slag binders"; *Brevet d'invention canadien nº* 963482; Bureau de brevets d'invention; Ottawa; 1975.

6. Thomas, E.G. et Cowling, R. "Pozzolanic behaviour of ground Isa Mine slag in cemented hydraulic mine fill at high slag/cement ratios"; In *Mining with Backfill*; 12th Canadian Rock Mechanics Symposium; CIM Special Volume 19; 1978.

7. Higgins, L.M. et Bauer, W.H. "Utilization of lead and zinc slags in ceramic construction products"; In *Conservation and Recycling* 3:375-382; Pergamon Press, London; 1980.

8. Ovcharenko, G.I. et coll. "Possibility of using Cu-Ni industrial slags for the production of structural materials" (en russe); Stroit, Maten Poputnikh Prod. Prom-sti 105-10; CA 92; 1978.

9. ASTM standards; C 593; 1983.

10. Douglas, E. Malhotra, V.M. et Emery, J.J. "Cementitious properties of non-ferrous slags from Canadian sources"; Cement, Concrete and Aggregates; ASTM; Vol. 7, No. 1; Été 1985.

11. Douglas, E., Mainwaring, P.R, et Hemmings, R. "Pozzolanic properties of Canadian non-ferrous slags"; Proceedings, 2nd International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete; CANMET and ACI; 21 au 25 avril; Madrid, Espagne; 1986.

12. McGuire, A.J. "Falconbridge slag as a cementing agent in backfill"; In *Mining with Backfill*; 12th Canadian Rock Mechanics Symposium; CIM Special Volume 19; 1978.

13. Roy, N.N. "Method for determination of glass content in quenched slag"; Falconbridge Nickel Mines Limited Canada, Rapport interne; 1975.

14. Hooton, D. "Pelletized slag cement: autoclave reactivity"; Thèse de doctorat; Université McMaster; 1981.

15. Douglas, E. et Mainwaring, P.R. "Hydration and pozzolanic activity of non-ferrous slags"; American Ceramic Society Bulletin; Vol. 64, No. 5; Mai 1985.

16. Roper, H., Kam, F, et Auld, G. "Characterization of a copper slag used in mine fill operations"; Proc 1st Int Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete; 31 juillet au 1er août; Montébello, Québec, Canada; 1983.

17. Landriault, D., Communication personnelle; INCO Mines Ltd.; Sudbury, Ont.; 1983.

18. Thomas, E.G. "Minimization of contamination of mine ore by cemented hydraulic fill"; *Proc Aust Inst Min Met* 251; 1974.

19. Douglas, E. "Characterization of non-ferrous slags from Canadian sources; Part I – Hydration of cementitious materials with special reference to non-ferrous slags"; *Rapport de division* ERP/MSL 83-81(LS); CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1983.

20. Barsotti, C. "The evaluation of fill mining at the Ontario Division of Inco Metals"; In *Mining with Backfill*, 12th Canadian Rock Mechanics Symposium; Special Volume 19; 1978.

21. Emery, J.J. "Characterization of non-ferrous slags from Canadian sources"; Report on Contract No. 26SQ.23440-2-9095; Laboratoires des sciences minérales; CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; Novembre 1984.

22. Midgley, H.G. "The formation and phase composition of portland cement clinker"; In *The Chemistry of Cement*; Vol. 1; H.F.W. Taylor, Éditeur; Academic Press; Londres, Angleterre; 1964.

23. Turriziani, R. "Aspects of the chemistry of pozzolans"; In *The Chemistry of Cements*; Vol. 2; H.F.W. Taylor; Éditeur; Academic Press; Londres, Angleterre; 1964.

24. Fournier, M. et Geoffray, J.M. "Le liant pouzzolanes-chaux"; Bull Liaison Labo P et Ch; 93:70; 1978.

25. Millet, J., Fournier, A., et Sierra, R. "Rôle des chaux industrielles dans leur emploi avec les matériaux à caractère pouzzolanique"; *Silica Ind*; 41/4-5:265-252; 1976.

26. Locher, F.W. "Hydraulic properties and hydration of glasses of the system $CaO-Al_2O_3-SiO_2$"; Proceedings of the 4th International Symposium on the Chemistry of Cement; Washington, É.-U.; 1962.

27. Sersale, R. "Structure and characterization of pozzolans and of fly-ashes"; 7th International Congress on the Chemistry of Cement; Paris; 1980.

28. Takemoto, K. et Uchikawa, V. "Hydration of pozzolanic cement"; 7th International Congress on the Chemistry of Cement; Paris; 1980.

29. Kam, F.S.Y. "Investigation of copper slag for use in mine fill"; Master's Thesis; School of Civil and Mining Engineering, Université de Sydney, Australie; 1984.

30. Douglas, E. et Malhotra, V.M. "Non-ferrous slags from Canadian sources. Part II – Properties and strength development"; *Rapport de division* ERP/MSL 84-30; CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada.

31. Douglas, E., Malhotra V.M., et Emery, J.J. "Characterization of non-ferrous slags from Canadian sources"; *Rapport de division* ERP/MSL 84-36; CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada;

32. Stutherheim, N. "Portland blast-furnace cements: A case for separate grinding of slag"; 5th International Symposium of Chemistry of Cement; Tokyo; 1968.

33. Thomas, E.G. "A review of cemented agents for hydraulic fill"; Austral Inst Mine Metall Jubilee Symposium on Mine Filling; Mount Isa; 1973.

34. Laneuville, J. "The hardening of nickel slags"; 7th Int Cong Chem Cement; Paris; 1980.

TABLEAUX

Tableau 1 — Analyse chimique de laitiers canadiens non ferreux (% en poids) (10)

	A Plomb (N.-B.) granulé	B Nickel (Ont.) refroidi à l'air	C Nickel (Ont.) trempé à l'eau	D Cuivre (Ont.) granulé	E Cuivre (Ont.) trempé à l'eau	F Cuivre (Qué.) refroidi à l'air	G Cuivre (Qué.) refroidi à l'air	H Cuivre (Qué.) trempé à l'eau	I Cuivre (Qué.) granulé
SiO_2	19,1	35,66	37,25	26,54	22,10	36,26	34,51	36,78	34,41
Al_2O_3	1,66	5,59	6,17	3,74	2,94	2,16	6,55	7,16	6,82
Fe_2O_3*	45,35	52,99	53,07	60,07	44,36	49,00	49,50	50,00	49,64
CaO	16,60	2,74	2,97	2,09	20,32	7,30	2,20	1,93	1,66
MgO	0,68	2,53	2,43	1,63	1,52	1,91	1,48	1,49	1,91
Na_2O	0,26	0,87	0,86	0,39	0,23	0,28	1,02	1,06	1,34
K_2O	0,25	0,65	0,62	0,33	0,98	1,26	1,01	0,96	0,66
TiO_2	0,14	0,32	0,33	0,14	0,12	0,13	0,35	0,39	0,28
MnO	0,09	0,07	0,07	0,10	0,08	0,08	0,10	0,09	0,08
Cu	—	—	—	1,10	—	0,48	0,43	0,41	0,48
Ni	—	0,23	0,25	—	—	—	—	—	—
Pb	4,84	—	—	—	—	—	—	—	—
LOI**	−5,75	−5,32	−6,00	−5,84	−4,39	−3,91	−5,24	−6,13	−4,73
S	1,30	1,46	1,39	1,28	0,45	1,01	1,20	1,13	1,00

*Fer total sous forme de Fe_2O_3.

**LOI à 700°C. Les valeurs négatives révèlent un gain après ignition causé par l'oxydation de FeO et du soufre.

Tableau 2 — Composition brute de laitiers canadiens non ferreux (% en poids)

Élément	J	I	C,D	G,H
FeO	55,1	44,6	50,3	40,9
CaO	2,1	16,7	3,5	17,6
ZnO	6,2	3,9	—	12,3
MgO	1,8	1,8	2,5	—
Al_2O_3	4,2	4,2	5,9	1,5
K_2O	0,4	0,4	0,7	0,2
CuO	—	—	—	0,1
PbO	—	—	—	3,0
TiO_2	—	—	0,3	—
SiO_2	32,1	30,6	36,6	23,5
S	0,8(s)	0,6(s)	1,5(s)	1,6(s)
Totaux	101,9	102,8	101,3	100,7

n.d. = non décelé (par E.D.X.A.).

S sous forme de soufre seulement, et non de SO_3, dans la colonne % en poids d'oxyde.

Tableau 3 — Constituants de laitier* de cuivre, par analyse de l'image (15)

Échantillon	Champ	R**	Verre	Fayalite	Spinelle	Sulfure
G,GB, Refroidi à l'air	30	1,5	41±4	57±6	5±1	0,2
H,HA, Trempé à l'eau	20	0,3-0,1	75-95	15-5	10-trace	—

*provenant du Québec.

**rapport cristaux/verre.

Tableau 4 — Composition du verre déterminée par microsonde électronique dans des laitiers de cuivre (Québec)

	A Laitier refroidi à l'air	B Laitier trempé à l'eau
MgO	—	1,4 ± 0,03
Al_2O_3	14,5 ± 0,2	10,1 ± 0,2
SiO_2	45,8 ± 0,8	38,6 ± 0,5
K_2O	2,1 ± 0,2	0,6 ± 0,03
CaO	3,6 ± 0,7	1,7 ± 0,04
MnO	0,1 ± 0,02	0,1 ± 0,03
Fe_2O_3*	28,7 ± 3,8	39,4 ± 0,6
ZnO	5,3 ± 0,7	5,0 ± 0,2
PbO	0,8 ± 0,1	0,4 ± 0,1
Total	100,9	101,4

*Fe total calculé sous forme de Fe_2O_3.

Tableau 5 — Énergie estimative en kWh/t nécessaire pour broyer un laitier de nickel (Ontario), calculée à partir des temps de broyage (15)

	Refroidi à l'air nº 1	Refroidi à l'air nº 2	Granulé
Finesse (cm^2/g, méthode Blaine)			
3 000	50	58	88
3 500	65	65	107
3 800	77	77	117
4 000	83	83	128

Tableau 6 — Répartition granulométrique dans un laitier de nickel granulé (Ontario), broyé à 3 000 cm²/g (12)

Taille (micromètres)	Pourcentage en poids	
	Laitier	Charge
+208	0,5	9,5
+1147	0,5	17,2
+104	0,7	16,7
+74	2,4	16,3
+53	9,7	11,3
+38	10,7	15,9
+27	29,7	12,2
+19	9,7	0,4
+13	9,9	0,2
+9	6,9	0,1
+7	4,42	0,06
+5	4,97	0,05
+3	4,97	0,05
+2	3,38	0,03
−2	1,36	0,01

Tableau 7 — Distribution granulométrique, aire surfacique et densité de laitiers de nickel broyés (Ontario), analysés pour leur activité pouzzolanique (17)

(a) Distribution granulométrique Microns	Terril CC**	
	% en poids	poids cum.
+74	0,09	0,09
45	0,14	0,23
37	0,09	0,32
23	2,57	2,89
17	12,88	15,77
13	14,08	29,85
−13	70,15	100,00
(b) Aire surfacique	A.S. (cm²)	
Blaine (cm²/g)	4437	
B.E.T. (m²/g)	20,9	
(Adsorption de gaz)		
Densité	3,30	

**Terril CC signifie: laitier du terril de Copper Cliff.

Tableau 8 — Consommation d'énergie pour le broyage des laitiers non ferreux (10)

Échantillon	Finesse moyenne mesurée cm²/g				Temps de broyage min				Énergie consommée kWh/t				Densité* cm²/g	% passant à 45 µm			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d		a	b	c	d
A	2029	2970	3891	5012	75	180	653	1335	30	72	261	534	4,00	76,52	85,55	87,59	88,52
B	2080	3044	4047	5026	50	75	115	178	20	30	46	71	3,54	70,57	83,68	91,49	94,59
C	2025	3098	3935	5019	60	75	120	210	24	30	48	84	3,45	69,49	86,94	91,32	95,16
D	2012	2976	4014	—	95	195	600	—	38	78	240	—	3,90	69,04	79,48	80,92	—
E	1995	3168	4095	4923	55	140	210	365	22	56	84	146	3,68	59,65	—	91,36	95,31
F	2034	3104	3955	4966	50	120	190	285	20	48	76	114	3,73	56,63	82,80	87,50	92,49
G	1979	3107	3927	4999	50	118	190	325	20	47	76	130	3,53	59,84	77,36	82,61	88,63
H	1985	3150	4138	4936	63	122	240	360	25	49	96	144	3,39	62,34	90,41	92,23	92,61
I	1987	2999	4049	5087	70	103	190	280	28	41	76	112	3,50	68,04	85,42	91,68	93,09
J	2032	2981	4118	4983	55	105	240	360	22	42	96	144	3,40	49,39	89,97	93,88	94,92
K	1975	2975	3968	—	70	240	600	—	28	96	150	—	3,58	63,12	71,77	73,82	—
L	1951	3031	3985	5038	65	140	240	420	26	156	96	168	3,40	66,04	92,42	93,79	94,47

Note: a, b, c, d représentent des laitiers broyés respectivement à 2 000, 3 000, 4 000, et 5 000 cm²/g.

*Densité mesurée avec des échantillons broyés à 4 000 cm²/g.

Tableau 9 — Besoins en énergie pour le broyage et composition de laitiers* non ferreux (10)

Laitier**	kWh/t	−75 µm, %	SiO_2, %	Fe_2O_3, %	Vitrification***
B	46	8	35,7	53,0	cristallisé
C	48	1	37,2	53,1	vitreux/cristallisé
F	76	2	36,3	49,0	cristallisé
G	76	3	34,5	49,5	cristallisé
I	76	1	34,4	49,6	vitreux/cristallisé
E	84	0,9	22,1	44,4	vitreux/cristallisé
H	96	0,5	36,8	50,0	très vitreux
J	96	4	42,8	45,8	vitreux
L (3 000 Blaine 96)	150	0,3	27,2	28,5	très vitreux
D (3 000 Blaine 78)	240	0,2	26,5	60,1	très vitreux
A	261	2	19,9	45,4	très vitreux

Note: Les besoins en énergie pour le broyage de laitier de ciment portland sont de 44 MJ/t; pour le laitier de haut fourneau, 48 kWh/t à 4 000 cm^2/g.

*Le laitier K n'a pas été évalué.
**Laitiers broyés à 4 000 cm^2/g, à moins d'indication contraire.
***Évaluation qualitative par diffraction des rayons X.

Tableau 10 — Indice d'activité du laitier pour des laitiers non ferreux, durcis dans une chambre humide à 23°C, avec remplacement en volume absolu de 50 % du ciment portland (10)

Finesse	Laitier A		B		C		D		E		F		G		H		I		J		K	
Blaine	7d	28d	7d	28d	7d	28d	7d	28d	7d	28d	7d	28d	7d	28d	7d	28d	7d	28	7d	28d	7d	28d
2 000	35	52	28	39	34	48	29	52	29	46	28	33	30	39	30	44	24	38	25	38	38	55
3 000	40	64	28	42	35	52	33	70	35	59	35	43	30	49	40	67	27	39	28	39	46	70
4 000	45	81	32	48	37	59	34	73	40	67	38	52	35	56	47	83	33	59	39	59	54	91
5 000	58	78	36	68	42	71	NG	NG	51	83	41	58	36	66	55	96	37	70	42	70	NG	NG

Notes: 1. Le ciment portland est conforme à la norme ASTM C 989, "spécifications pour laitier broyé de haut fourneau, utilisé dans le béton et les mortiers", tableau 3.
2. La valeur nominale laine, en cm^2/g, pour les laitiers était de 2 000, 3 000, 4 000 et 5 000.
3. NG signifie que le laitier n'a pas été broyé à ce degré de finesse.

Tableau 11 — Composition chimique de laitiers de nickel, refroidis à l'air et trempés à l'eau (Ontario) (17)

	Fe	S	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	$\%Al_2O_3 + \%CaO + \%MgO/\%SiO_2$ hydraulique modulus
Nickel de réverbère refroidi à l'air	36,0	1,5	35,5	2,25	2,50	5,05	0,2761
Nickel de réverbère, trempé à l'eau	35,8	1,4	36,8	2,30	2,45	5,55	0,2799
Laitier de haut fourneau, refroidi à l'air	35,8	1,5	30,8	7,00	2,45	6,00	0,5016
Laitier de haut fourneau, trempé à l'eau	34,4	1,4	31,0	7,05	2,50	6,50	0,5177
Nickel de réverb, +14 % de chaux, trempe à l'eau	32,9	1,4	32,8	9,40	2,45	5,85	0,5396
Quartz broyé	0,58	—	87,7	0,27	0,029	1,10	0,0160

Tableau 12 — Composition des spécimens renfermant des laitiers de nickel, refroidis à l'air et trempés à l'eau (Ontario) (17)

Série nº	1	2	3	4	5	6	7
Description							
% en poids de laitier	0	0	1,2	4,5	4,5	8,7	16,0
% en poids de ciment	9,1	4,8	4,7	4,6	4,5	4,4	4,0
% en poids de résidus	90,9	95,2	94,1	93,1	91,0	86,9	80,0
% total en poids de liants	9,1	4,8	5,9	6,9	9,0	13,1	20,0
% de ciment remplacé	0	0	20	33	50	66	80
Résidus/ciment/laitier	10:1:0	20:1:0	20:1:25	20:1:50	20:1:1	20:1:2	20:1:4

Tableau 13 — Indices d'activité pouzzolanique et d'activité de laitier pour des mortiers de laitier-ciment portland (Québec), durcis à la température de la pièce (21)

PI/HI*	Cuivre refroidi à l'air	Cuivre trempé à l'eau
2 000	0,71/0,32	0,67/0,31
3 000	0,73/0,36	0,87/0,27
4 000	0,89/0,49	0,85/0,70
5 000	0,91/0,38	1,06/0,52

*PI:indice pouzzolanique; HI:indice d'activité du laitier (indice hydraulique).

Tableau 14 — Indices pouzzolanique et hydraulique de laitiers canadiens non ferreux (ASTM C 595) (21)

PI/HI	Pomb (N.-B.) granulé	Nickel (Ont.) refroidi à l'aid	Nickel (Ont.) trempé à l'eau	Cuivre (Ont.) granulé	Cuivre (Ont.) trempé à l'eau	Cuivre (Qué.) refroidi à l'air	Cuivre (Qué.) refroidi à l'air	Cuivre (Qué.) trempé à l'eau	Cuivre (Qué.) granulé
2 000	0,50/0,25	0,64/0,40	0,55/0,26	0,48/0,24	0,57/0,33	0,49/0,24	0,58/0,39	0,51/0,32	0,56/0,32
3 000	0,54/0,27	0,73/0,43	0,67/0,41	0,69/0,29	0,72/0,43	0,67/0,35	0,80/0,49	0,73/0,42	0,70/0,40
4 000	0,96/0,29	0,83/0,58	0,78/0,44	0,69/0,31	0,76/0,45	0,70/0,47	0,85/0,59	0,80/0,54	0,79/0,50
5 000	1,01/0,36	0,98/0,67	0,88/0,57	NG	0,81/0,52	0,83/0,53	1,02/0,71	0,85/0,69	0,83/0,64

Notes: 1. Finesse Blaine nominale des laitiers: 2 000, 3 000, 4 000 et 5 000.
2. NG signifie que le laitier n'a pas été broyé à ce degré de finesse.
3. PI et HI sont les indices pouzzolaniques (indice d'activité pouzzolanique) et hydraulique (indice d'activité du laitier), avec respectivement la chaux et le ciment, conformément à la norme ASTM C 595.

Tableau 15 — Résistance relative de mortiers de ciment portland et de laitier de nickel, montrant l'effet de la finesse (5)

Finesse du laitier (cm^2/g)	Nombre de jours de prise	Résistance relative (%)
3 000 (granulé)	3	63
	7	66
	28	81
4 000 (refroidi à l'air)	3	60
	7	72
	28	78
7 700 (refroidi à l'air)	3	68
	7	75
	28	90

Tableau 16 — Résistance à la compression uniaxiale d'un laitier de cuivre broyé de four à réverbère et de pâtes de $Ca(OH)_2$ (29) (rapport eau/solides = 0.30)

CRFS*:$CA(OH)_2$	Résistance (MPa)	Moyenne (MPa)	Écart-type (MPa)
1:1	6,632	5,851	1,842
	3,314		
	5,834		
	7,622		
2:1	4,678	4,686	0,143
	4,882		
	4,540		
	4,642		

*CRFS: laitier de cuivre de four à réverbère.

Tableau 17 — Effet de la masse volumique et de la teneur en eau sur la résistance initiale à la compression d'un remblai (24)

Masse volumique (à sec) (g/cm^3)	Teneur en eau (g)	Résistance (MPa)
2,21	29,7	2,028
2,10	12,3	1,596
2,10	15,2	1,331
2,18	13,5	1,852
2,17	12,6	1,869
1,96	16,3	0,926
2,13	13,8	1,719
2,23	11,9	1,772
2,15	13,3	1,640
2,18	12,6	1,940
2,20	13,2	2,134
2,10	15,5	1,667

Tableau 18 — Mélanges pour résidus de mine agglomérés et évolution de la résistance à la compression (21)

Mélange	Laitier, mélange nº 1	Laitier, mélange nº 2	Laitier, mélange nº 3
Résistance à la compression, MPa			
7 jours (résistance non suffisante pour l'analyse)	—	—	—
28 jours	2,2	2,3	2,5
	2,1	2,1	2,4
	1,9	2,3	2,5
Moyenne	2,1	2,2	2,5
90 jours	1,63	1,62	1,66
	1,66	1,68	1,68
	1,59	1,67	1,69
Moyenne	1,63	1,66	1,68
Laitier 4 000 Blaine, kg	0,100	0,232	0,300
Ciment type 10, kg	0,100	0,116	0,100
Résidus NRT, kg	2,300	2,552	2,100
Eau, kg	0,750	0,870	0,750

Note: remplacement en volume absolu non adopté.

Mélange nº 1: 4 % de laitier 4 000 Blaine et 4 % de ciment portland type 10.
Mélange nº 2: 8 % de laitier 4 000 Blaine et ciment portland type 10.
Mélange nº 3: 12 % de laitier 4 000 Blaine et 4 % de ciment portland type 10.

Tableau 19 — Mélanges pour remblai de roches agglomérées, et évolution de la résistance à la compression du remblai (21)

Résistance à la compression	
7 jours (résistance non suffisante pour l'analyse	
28 jours	1,04
	1,14
	0,88
Moyenne	1,02
90 jours	1,59
	1,88
	1,72
Moyenne	1,73
Mélange	
KCCG 3 000, kg	3,27
Ciment ASTM Type 10, kg	2,18
Remblai de roche à texture fine, kg	27,27
Remblai de roche, à texture grossière, kg	81,82
Eau, kg	5,46

Notes: 1. Quelques zones de ségrégation observées avec les cylindres d'essai.
2. Remplacement en volume absolu non adopté.

Tableau 20 — Résistance à la compression, après 28 jours, de cubes de mortier durcis à 38°C, avec remplacement en volume absolu de 20, 35, 50 et 70 % de ciment portland par du laitier (21)

	Plomb (N.-B.) granulé	Nickel (Ont.) refroidi à l'air	Nickel (Ont.) trempé à l'eau	Cuivre (Ont.) granulé	Cuivre (Ont.) trempé à l'eau	Cuivre (Qué.) refroidi à l'air	Cuivre (Qué.) refroidi à l'air	Cuivre (Qué.) trempé à l'eau	Cuivre (Qué.) granulé
TÉMOIN	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6
20 %									
2 000 MPa	21,4	22,5	17,1	16,0	20,7	20,8	21,7	19,3	20,2
3 000	22,7	24,0	20,9	23,4	23,6	22,1	25,2	23,9	20,6
4 000	30,5	24,8	23,8	25,4	25,8	24,6	26,5	25,7	24,6
5 000	32,3	30,2	26,3	NG	27,5	25,0	30,8	27,6	26,2
35 %									
2 000 MPa	14,7	18,9	16,4	14,2	17,0	14,6	17,2	15,1	16,6
3 000	16,1	21,5	19,7	20,4	21,3	19,8	23,7	21,5	20,8
4 000	28,5	24,5	23,0	20,3	22,5	20,8	25,3	23,8	23,5
5 000	30,0	29,1	25,9	NG	24,1	24,6	30,3	25,3	24,3
50 %									
2 000 MPa	13,7	18,3	13,9	9,5	13,8	11,3	14,6	13,4	13,3
3 000	15,0	19,1	17,3	15,5	18,0	18,0	22,7	20,2	17,3
4 000	20,6	21,4	20,9	17,8	18,8	19,7	23,9	23,6	21,3
5 000	22,3	28,7	25,4	NG	19,6	23,3	26,9	24,4	22,0
70 %									
2 000 MPa	7,3	11,9	7,8	7,2	9,7	7,0	11,5	9,7	9,6
3 000	7,9	12,8	12,1	8,5	12,8	10,5	14,5	12,5	11,7
4 000	8,5	17,1	13,0	9,1	13,4	13,9	17,5	16,0	14,7
5 000	10,8	19,8	16,8	NG	15,5	15,6	21,0	20,4	18,8

Notes: 1. Le ciment portland doit être de Type 10 Acnor.
2. Finesses nominales Blaine des laitiers: 2 000, 3 000, 4 000, et 5 000.
3. Toutes les résistances à la compression sont données en MPa.
4. NG signifie que le laitier n'a pas été broyé à ce degré de finesse.

Tableau 21 — Résistance à la compression, à 23°C, de cubes de mortier, avec remplacement en volume absolu de 50 % du ciment portland par du laitier (21)

			Nickel Plomb (N.-B.) granulé	Nickel (Ont.) refroidi à l'air	(Ont.) trempé à l'eau	Cuivre Cuivre (Ont.) granulé	Cuivre (Ont.) trempé à l'eau	Cuivre (Qué.) refroidi à l'air	Cuivre (Qué.) refroidi à l'air	(Qué.) trempé à l'eau	Cuivre (Qué.) granulé
TÉMOIN		7D	31,3	31,3	31,3	31,3	31,3	31,3	31,3	31,3	31,3
		28D	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8
2 000											
Jours	1	MPa	7,0	3,9	4,8	4,6	4,7	3,1	3,3	4,3	3,8
	7		10,8	8,7	10,7	9,0	9,1	8,8	9,2	9,3	7,4
	28		19,1	14,2	17,8	19,0	17,0	12,0	14,4	16,2	13,8
	90		29,5	21,6	23,0	25,1	21,7	16,7	19,4	21,1	18,5
3 000											
Jours	1	MPa	8,5	4,0	5,0	4,9	5,0	4,7	3,3	5,0	4,0
	7		12,4	8,8	10,8	10,3	11,0	10,9	9,5	12,6	8,6
	28		23,5	15,6	19,3	25,7	21,8	15,7	18,0	24,6	14,3
	90		37,9	26,0	26,1	29,7	26,5	20,6	25,9	32,0	24,3
4 000											
Jours	1	MPa	12,1	4,1	5,2	5,6	6,3	5,0	4,3	5,6	4,7
	7		14,1	10,0	11,7	10,5	12,5	12,0	11,0	14,8	10,3
	28		29,8	17,5	21,7	26,7	24,8	19,2	20,5	30,5	21,6
	90		40,2	28,3	26,6	31,4	31,1	23,2	29,2	37,3	29,1
5 000											
Jours	1	MPa	14,1	4,4	7,0	NG	7,5	5,1	4,5	5,9	5,3
	7		18,2	11,2	13,1		16,0	12,9	11,2	17,1	11,5
	28		28,7	25,0	26,2		30,4	21,3	24,2	35,2	25,9
	90		43,7	33,1	31,7		38,9	26,8	32,0	38,3	32,8

Notes: 1. Le ciment portland est conforme à la norme ASTM "spécifications pour laitier broyé de haut fourneau, utilisé dans le béton et les mortiers".
2. Finesse nominale Blaine des laitiers: 2 000, 3 000, 4 000, et 5 000.
3. Toutes les résistances à la compression sont données en MPa.
4. NG signifie que le laitier n'a pas été broyé à ce degré de finesse.

Tableau 22 — Gradations des agrégats grossiers et fins pour les mélanges de béton (21)

	Crible	% passant au crible	% devant passer, selon Acnor A23.1
agrégat grossier	25,4 mm	100	100
	19 mm	95	90-100
	12,7 mm	52	30-75
	9,5 mm	36	20-55
	4,75 mm	2	0-10
agrégat fin	9,5 mm	100	100
	4,75 mm	97	95-100
	2,36 mm	85	80-100
	1,18 mm	72	50-85
	600 µm	52	25-60
	300 µm	22	10-30
	150 µm	6	2-10

Tableau 23 — Évolution de la résistance à la compression de mélanges à béton, renfermant 50 % de laitiers non ferreux broyés, incorporés par remplacement en volume absolu de ciment portland de type 10, avec addition réductrice d'eau (WRA) (21)

Mélange	A	A	B	D	D	E	G	G	H	H	I	MICG	TÉMOIN	TÉMOIN	TÉMOIN
Détails pour le mélange	3 000	4 000	3 000	4 000	3 000	4 000	3 000	3 000	4 000	3 000	4 000	4 000 (Origine étrangère)	1	2	3 (utilisation comme témoin)
Laitier non ferreux broyé, kg	8,32	8,32	7,36	7,36	8,09	8,09	7,04	7,31	7,31	4,77	4,77	6,54	—	—	—
Ciment de Type 10, kg	6,54	6,54	6,54	6,54	6,54	6,54	6,04	6,54	6,54	4,45	4,45	6,04	13,09	13,09	13,09
Agrégat fin, kg	38,41	38,41	38,41	38,41	38,41	38,41	35,54	38,41	38,41	26,05	26,05	35,54	38,41	38,41	38,41
Agrégat grossier, kg	52,86	52,86	52,86	52,86	52,86	52,86	48,96	52,86	52,86	35,91	35,91	48,96	52,86	52,86	52,86
Eau, kg	7,28	7,28	6,82	6,82	7,17	7,17	6,41	6,80	6,80	4,50	4,50	6,18	6,46	6,46	6,46
WRA, mL	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	60,7 (Mulco A)	60,7 (Mulco A)	60,7 (Mulco A)
Affaissement, mm	130	130	75	75	110	120	50	70	100	55	50	65	45	40	70,0
Air, %	1,5	1,5	2,2	1,9	1,5	1,9	1,7	1,5	1,4	1,9	1,9	1,9	3,9	3,2	3,4
Température, °C	20	19	20	20	20	20	20	20	20	20	21	20	20	21	19
Densité apparente, kg/m³	1937	1963	1949	1923	1958	1953	1937	1958	1958	1968	1930	1940	1928	1928	1977
Résistance à la compression, MPa															
7 jours	9,5	12,4	9,2	10,7	9,9	10,2	10,7	9,7	9,2	10,7	13,8	11,0	27,6	32,0	29,2
	9,3	11,9	9,2	10,2	9,4	11,1	10,5	9,6	9,2	11,0	14,0	11,2	27,3	31,0	29,8
	10,0	12,1	9,7	10,7	9,5	10,4	10,7	9,4	9,5	11,0	13,8	11,5	28,1	32,0	28,3
Moyenne	9,6	12,1	9,4	10,5	9,6	10,6	10,6	9,6	9,3	10,9	13,9	11,2	27,7	31,6	29,1
28 jours	23,7	28,5	16,8	20,1	22,4	24,7	21,4	17,3	18,4	23,4	27,5	24,5	35,6	40,8	37,4
	21,4	27,3	17,3	20,4	22,4	24,7	21,7	19,4	18,9	23,2	27,0	26,0	35,9	41,0	37,9
	21,7	30,3	16,8	20,9	21,9	26,0	21,2	18,4	18,9	24,0	26,3	24,5	—	40,5	38,1
Moyenne	22,2	28,7	17,0	20,5	22,2	25,1	21,4	18,4	18,8	23,5	26,9	25,0	35,8	40,8	37,8
90 jours	32,6	40,8	23,4	28,5	28,0	28,5	31,6	24,5	24,0	27,5	31,1	30,6	42,2	49,0	45,4
	35,6	39,7	24,0	26,0	28,0	30,1	30,1	25,5	25,0	27,5	31,2	30,1	42,3	47,3	44,2
	35,7	42,8	22,9	27,0	27,5	29,6	31,1	24,5	26,0	27,0	31,1	31,1	—	47,7	44,5
Moyenne	34,6	41,1	23,4	27,8	27,8	29,4	30,9	24,8	25,0	27,3	31,1	30,6	42,2	48,0	44,7

Note: Tous les mélanges et essais, sont conformes aux normes A23.1 et A23.2 de l'Acnor, utilisant des cylindres de 100 mm de diamètre par 200 mm, excepté le témoin 1 (cylindres de 150 mm de diam. par 300 mm).

Tableau 24 — Évolution de la résistance à la compression de mélanges à béton, renfermant 50 % de laitiers non ferreux broyés, incorporés par remplacement en volume absolu de ciment portland de type 10, avec addition réductrice d'eau (WRA) (21)

Mélange	B	B		C	F	G
Détails pour le mélange	3 000 WRA	4 000 WRA	C	WRA	4 000 WRA	3 000 WRA
Laitier non ferreux broyé, kg	7,36	7,36	7,14	7,14	7,77	7,32
Ciment de Type 10, kg	6,54	6,54	6,54	6,54	6,54	6,54
Agrégat fin, kg	38,41	38,41	38,41	38,41	38,41	38,41
Agrégat grossier, kg	52,86	52,86	52,86	52,86	52,86	52,86
Eau, kg	6,46	6,46	6,46	6,46	6,46	6,46
WRA, mL	64,5 (TCDA A)	64,5 (TCDA A)	—	63,5 (Mulco A)	66,4 (Mulco A)	64,3 (TCDA A)
Affaissement, mm	110	90	40	90	90	90
Air, %	4,0	3,3	2,5	5,3	3,3	3,7
Température, °C	21	21	20	22	21	21
Densité apparente, kg/m³	1967	1936	1954	1913	1937	1967
Résistance à la compression, MPa						
7 jours	12,2	12,0	14,8	14,8	15,0	11,2
	12,2	11,7	13,8	14,8	14,5	11,7
	11,7	12,4	13,8	14,0	14,8	11,7
Moyenne	12,0	12,0	14,1	14,5	14,8	11,5
28 jours	21,4	24,5	22,9	24,0	23,4	22,9
	21,9	24,5	22,4	23,2	24,0	24,0
	21,4	25,0	23,4	22,9	23,4	24,0
Moyenne	21,6	24,7	22,9	23,9	23,6	23,6
90 jours	30,6	31,1	31,1	30,1	27,8	30,6
	29,6	31,6	30,1	31,1	28,8	31,6
	29,1	21,1	20,1	31,2	28,3	31,7
Moyenne	29,8	31,3	30,4	30,8	28,3	31,3

Note: Tous les mélanges et essais, sont conformes aux normes A23.1 et A23.2 de l'Acnor, utilisant des cylindres de 100 mm de diamètre par 200 mm.

FIGURES

ÉCONOMIES DE RESSOURCES ET D'ÉNERGIE GRÂCE AUX LAITIERS CANADIENS NON FERREUX

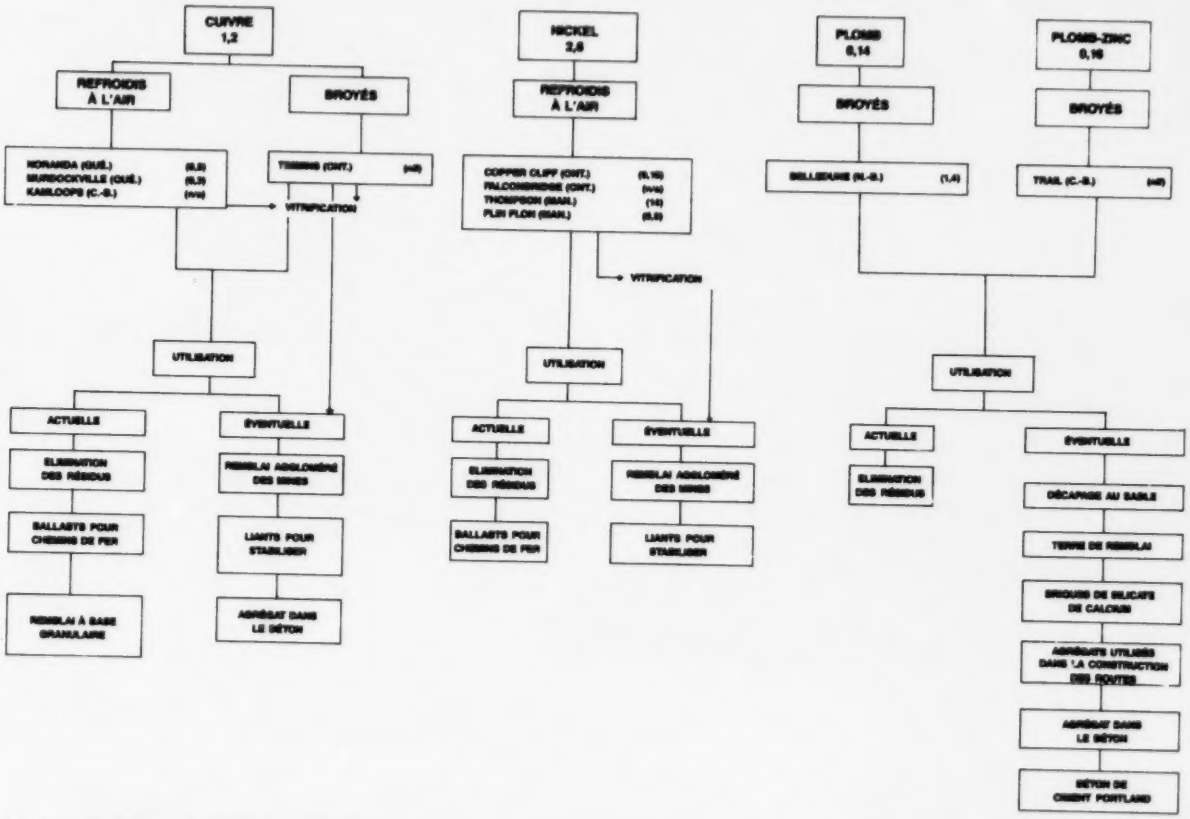


Fig. 1 — Production, situation géographique et utilisation de laitiers non ferreux provenant de sources canadiennes (2)

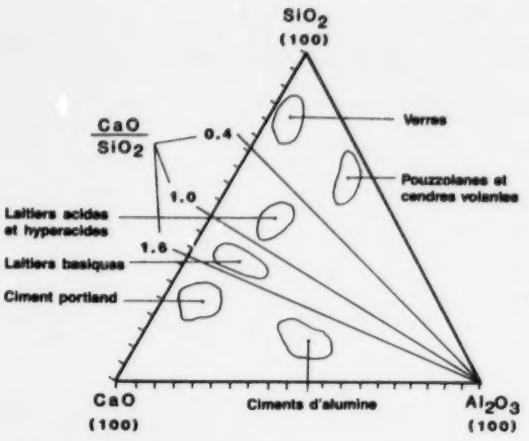


Fig. 2a — Représentation de certains matériaux liants dans le système CaO-SiO_2-Al_2O_3

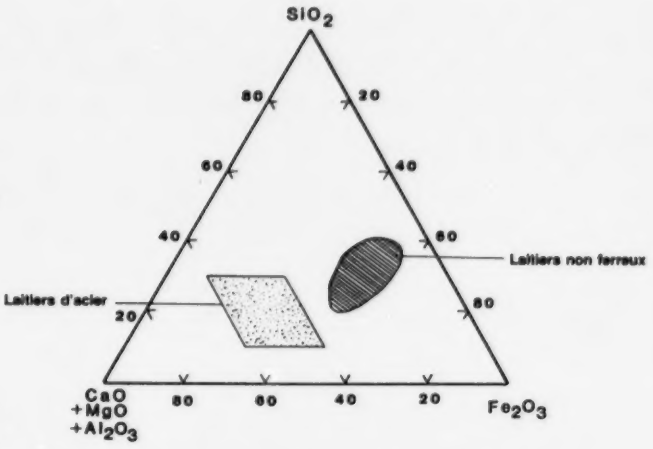


Fig. 2b — Représentation de certains matériaux liants dans le système CaO-SiO_2-Fe_2O_3

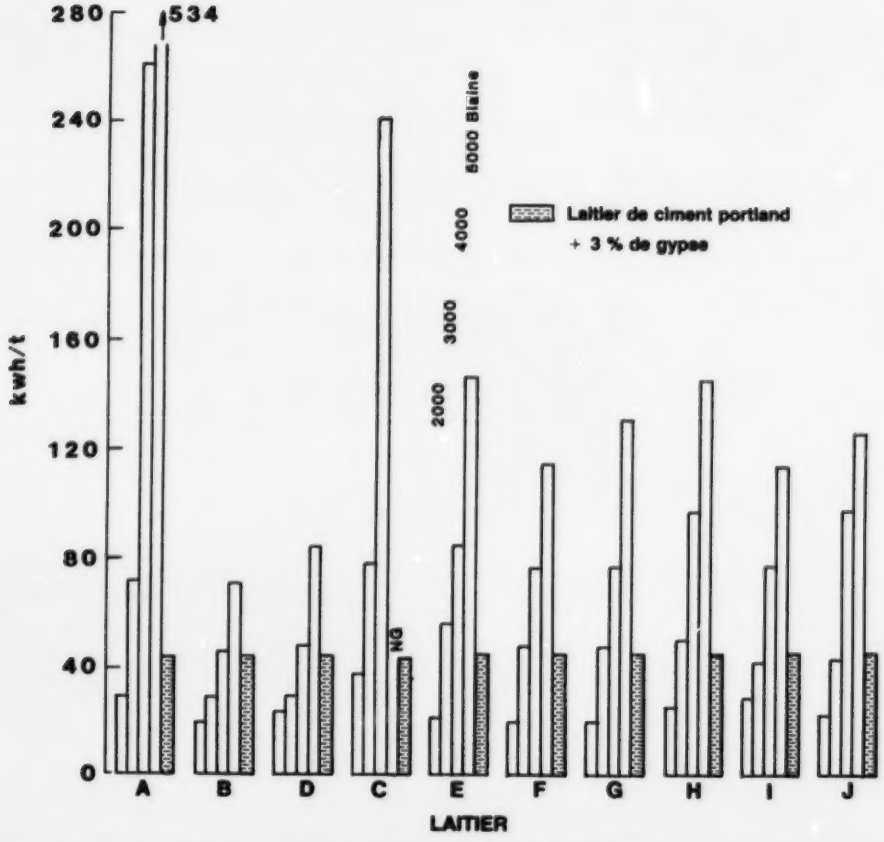


Fig. 3 — Consommation d'énergie pour le broyage industriel de laitiers non ferreux (10)

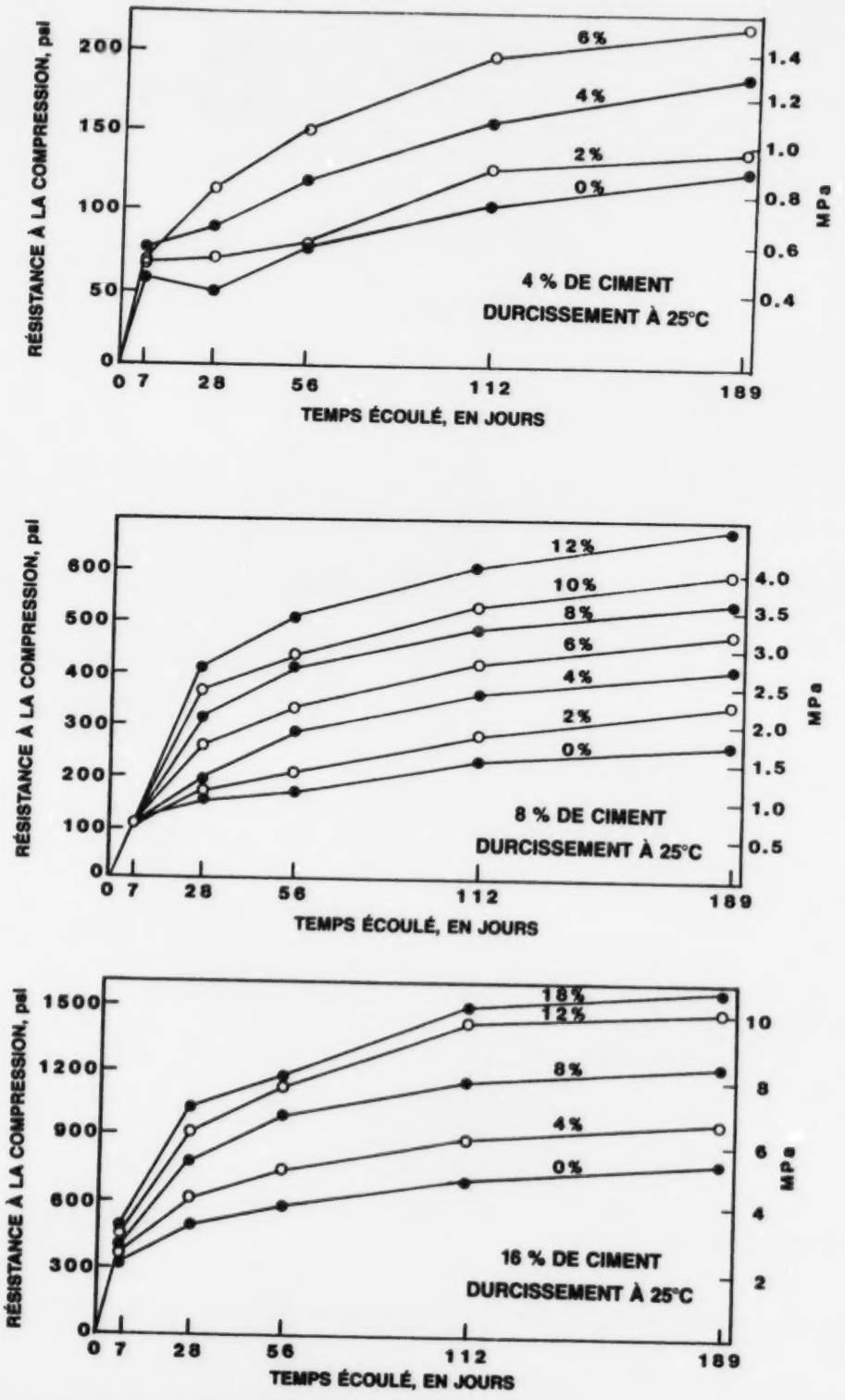


Fig. 4 — Courbes de durcissement montrant l'amélioration de la résistance grâce au laitier de cuivre broyé de four à réverbère, possédant une activité pouzzolanique à différentes teneurs en ciment (3)

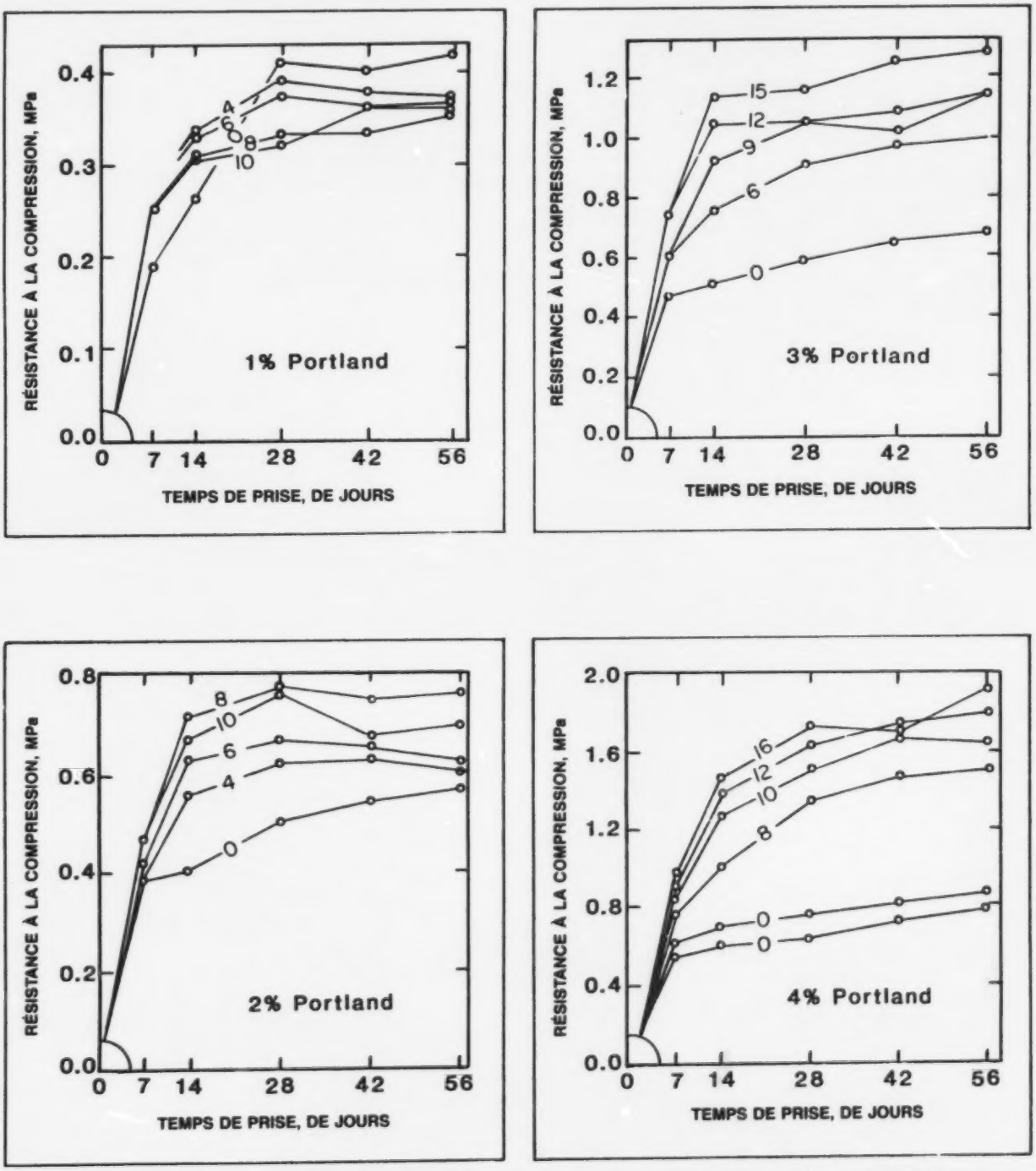


Fig. 5 — Courbes de durcissement à 1, 2, 3 et 4 % en poids de ciment portland et pour diverses additions de laitier de cuivre de four à réverbère, comme l'indique chaque courbe (6)

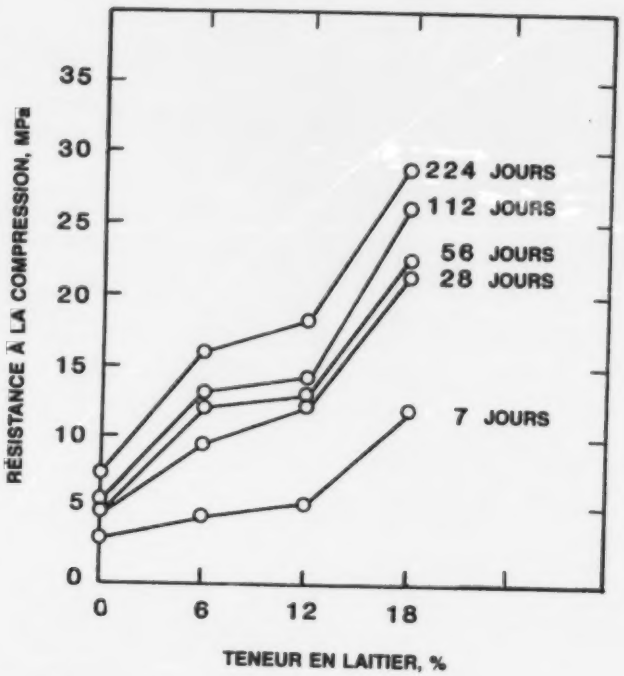


Fig. 6 — Effet d'un laitier granulé broyé sur la résistance à la compression uniaxiale d'un remblai consolidé renfermant 6 % de ciment portland (12)

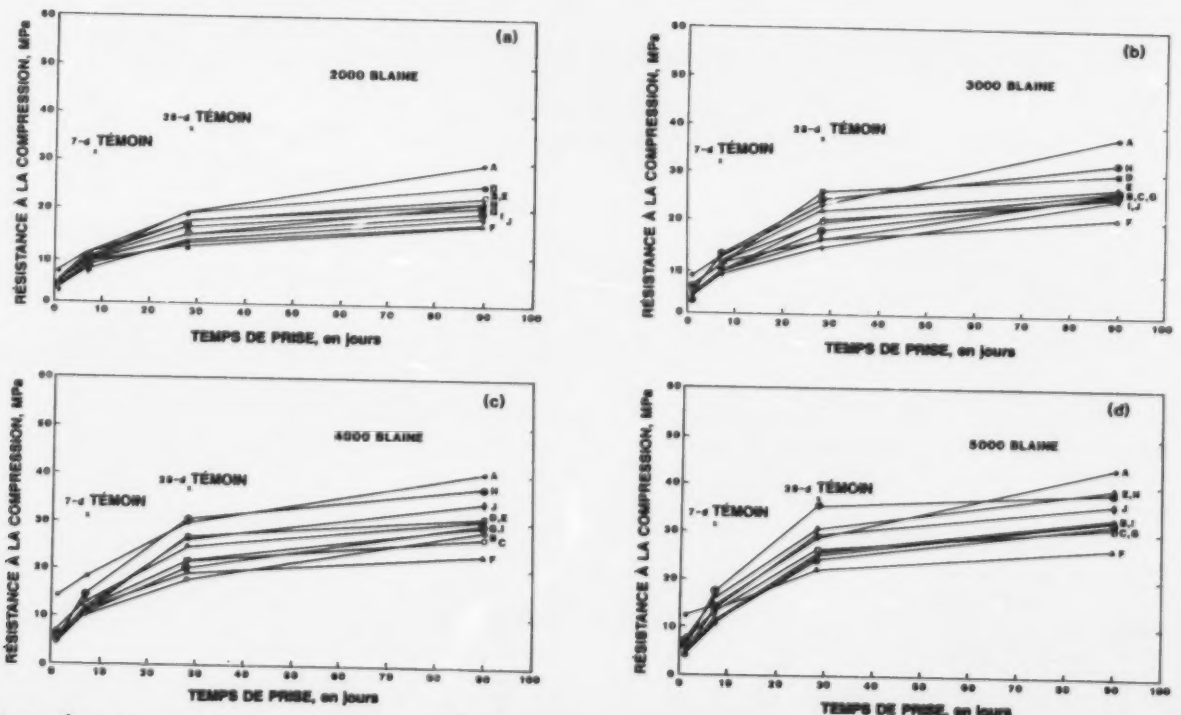


Fig. 7 — Évolution de la résistance à la compression à 23°C de mortiers durcis en présence d'humidité, renfermant 50 % de laitiers par remplacement en volume absolu du ciment portland (10)

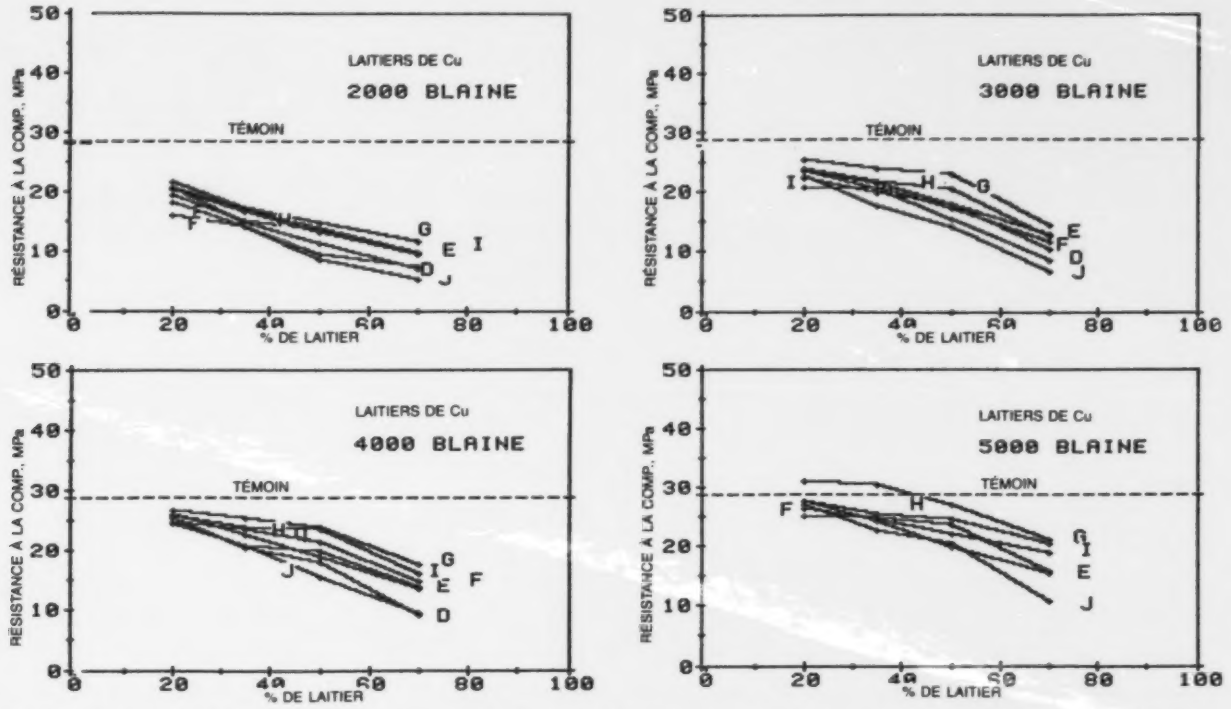


Fig. 8 — Résistance à la compression de mortiers de ciment portland et de laitier de cuivre après 28 jours de durcissement (10)

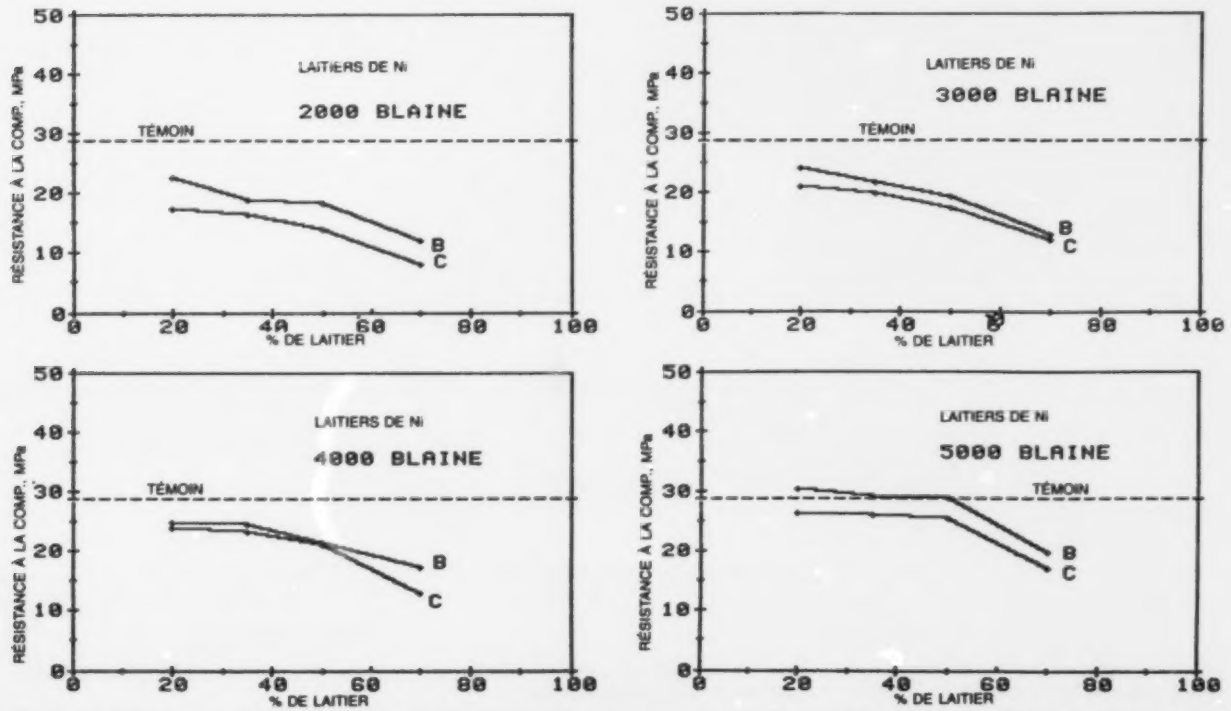


Fig. 9 — Résistance à la compression de mortiers de ciment portland et de laitiers de nickel après 28 jours de durcissement (10)

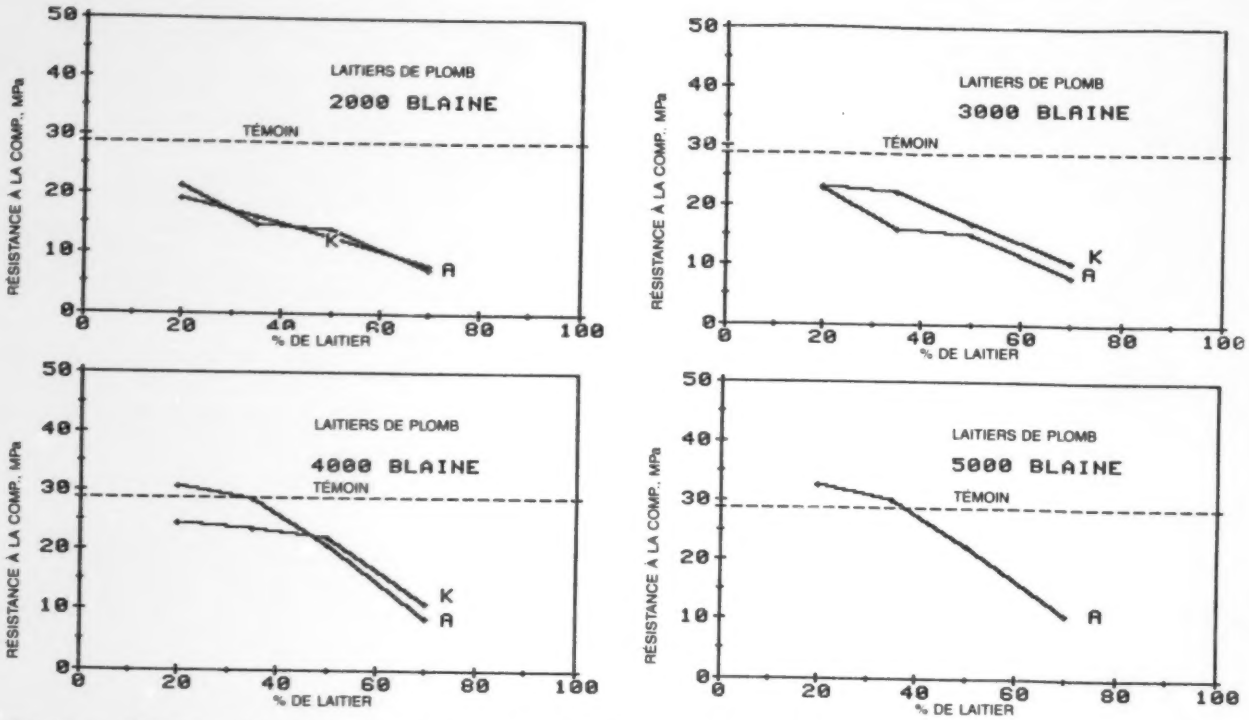


Fig. 10 — Résistance à la compression de mortiers de ciment portland et de laitiers de plomb après 28 jours de durcissement (10)

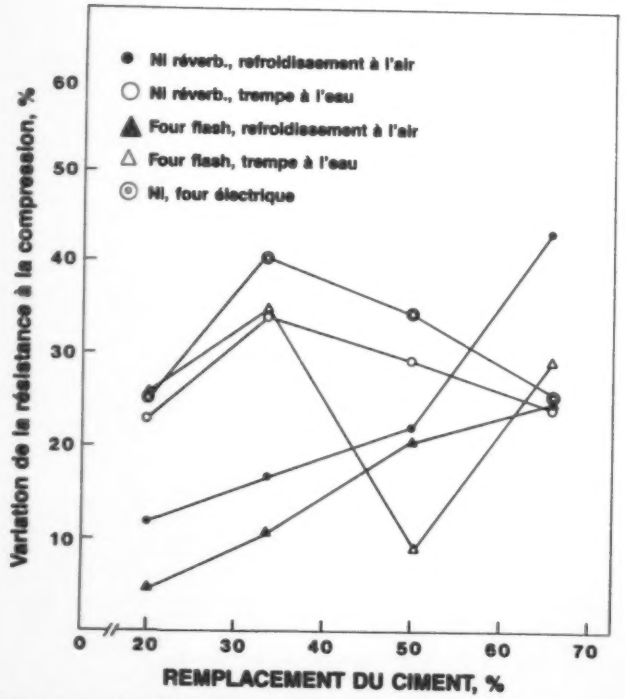


Fig. 11 — Variation de la résistance après différents temps de prise, calculée grâce à des spécimens normaux à 4,8 % en poids de ciment portland, durcis pendant le même temps lors d'essais pouzzolaniques à divers taux de remplacement du ciment (20)

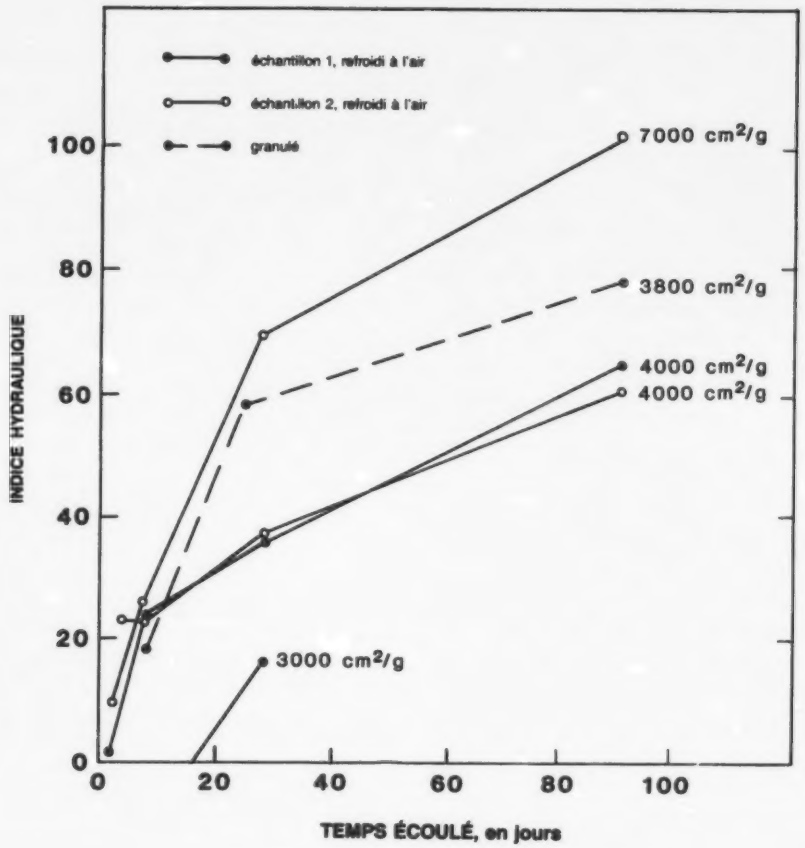


Fig. 12 — Indice hydraulique de laitiers de nickel, refroidis à l'air et granulés, avec différents degrés de finesse (5)

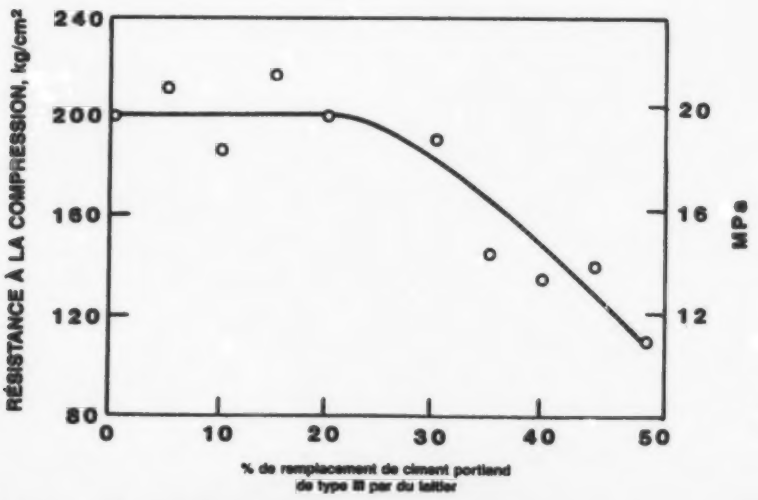
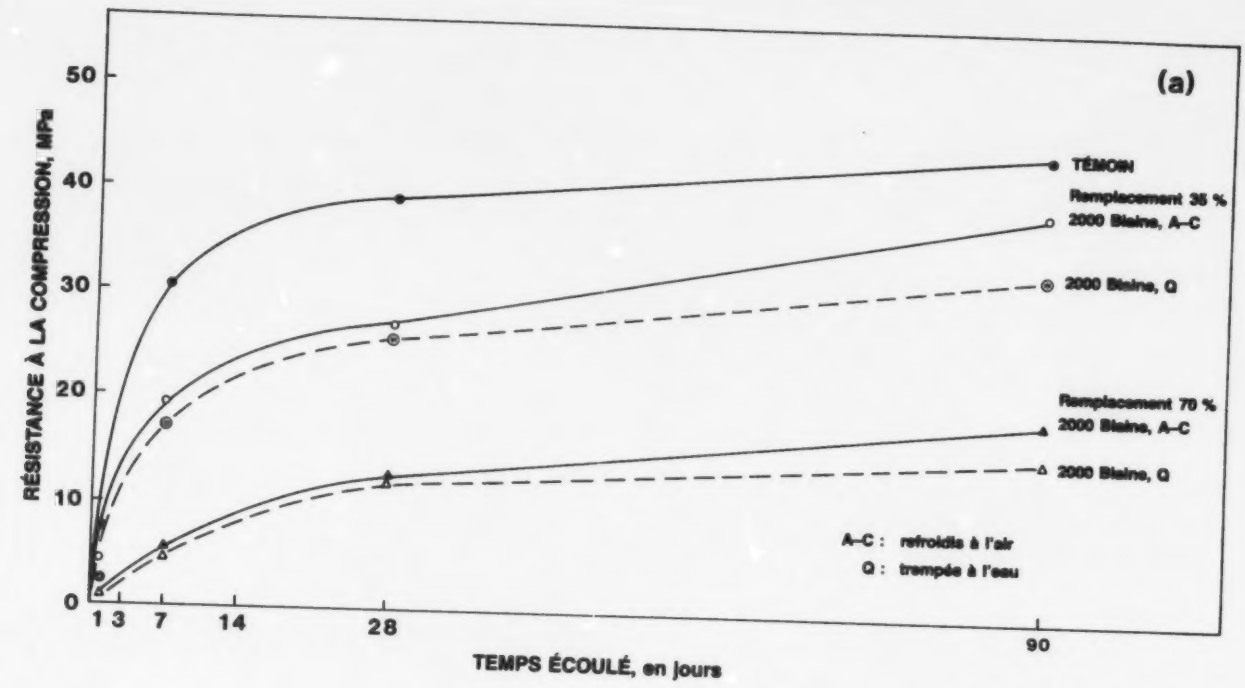


Fig. 13 — Résistance à la compression de liants de laitier de plomb et de ciment portland de type III, pour divers taux de remplacement du ciment (7)



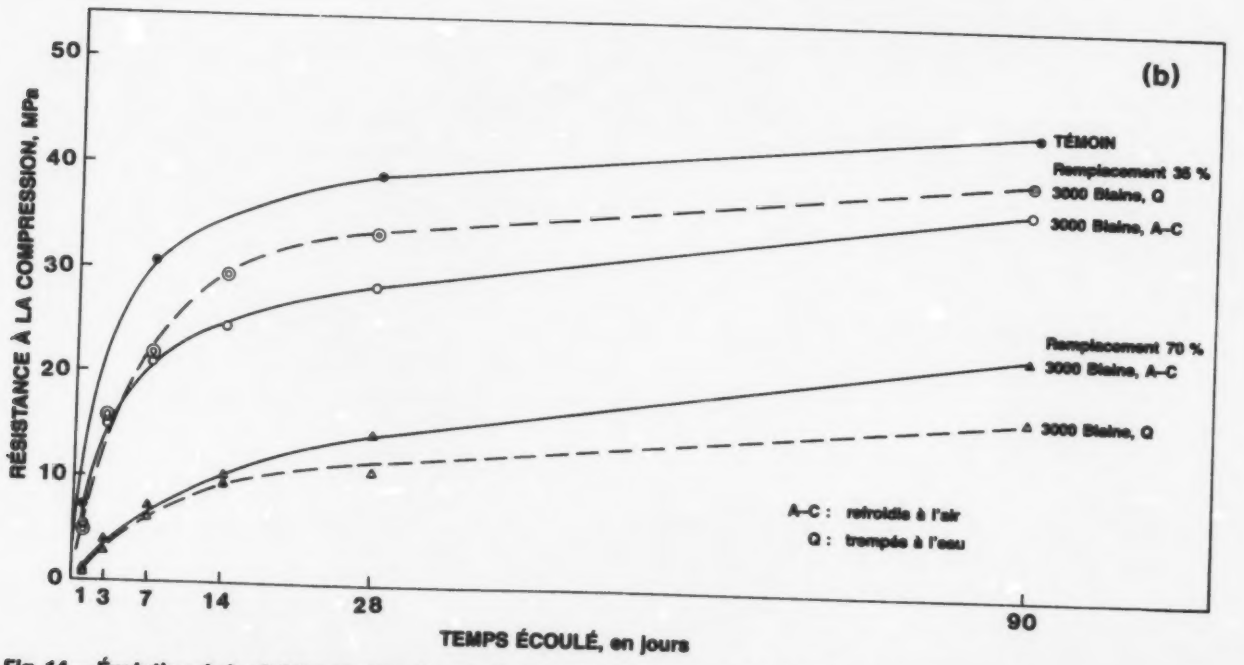


Fig. 14 — Évolution de la résistance dans des mortiers de ciment portland et de laitier de cuivre, durcis à la température de la pièce (15)

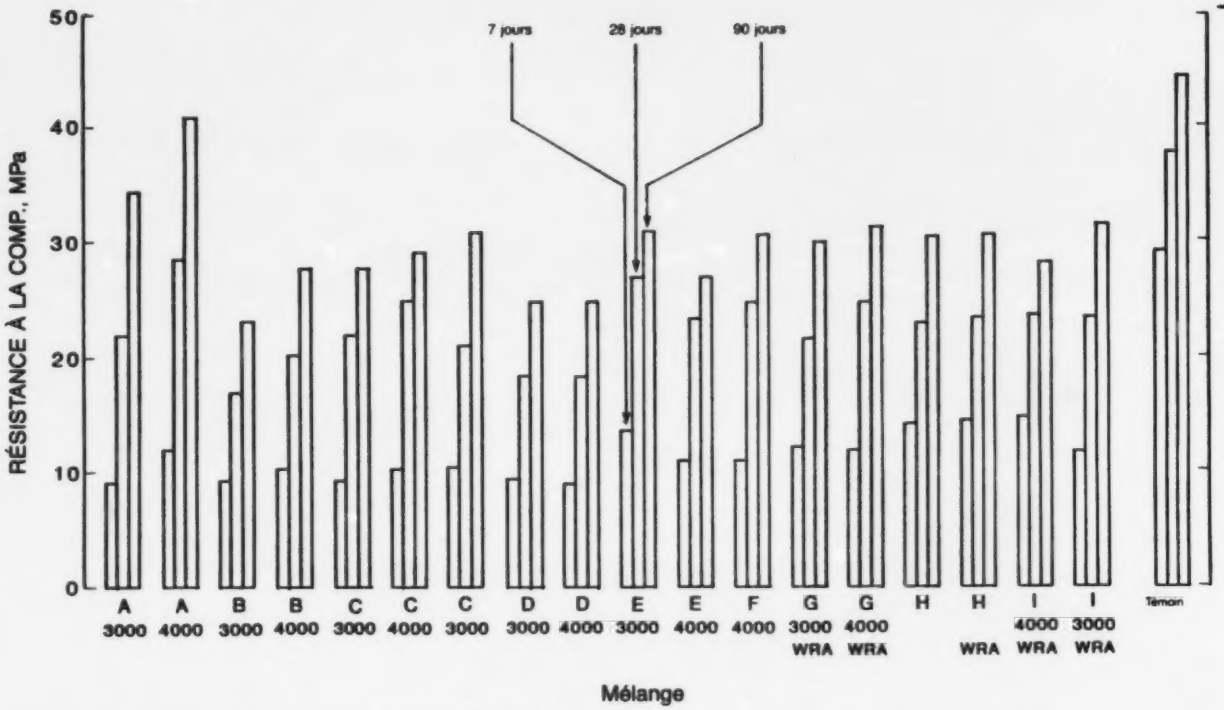


Fig. 15 — Résistance à la compression de mélanges à béton (21)

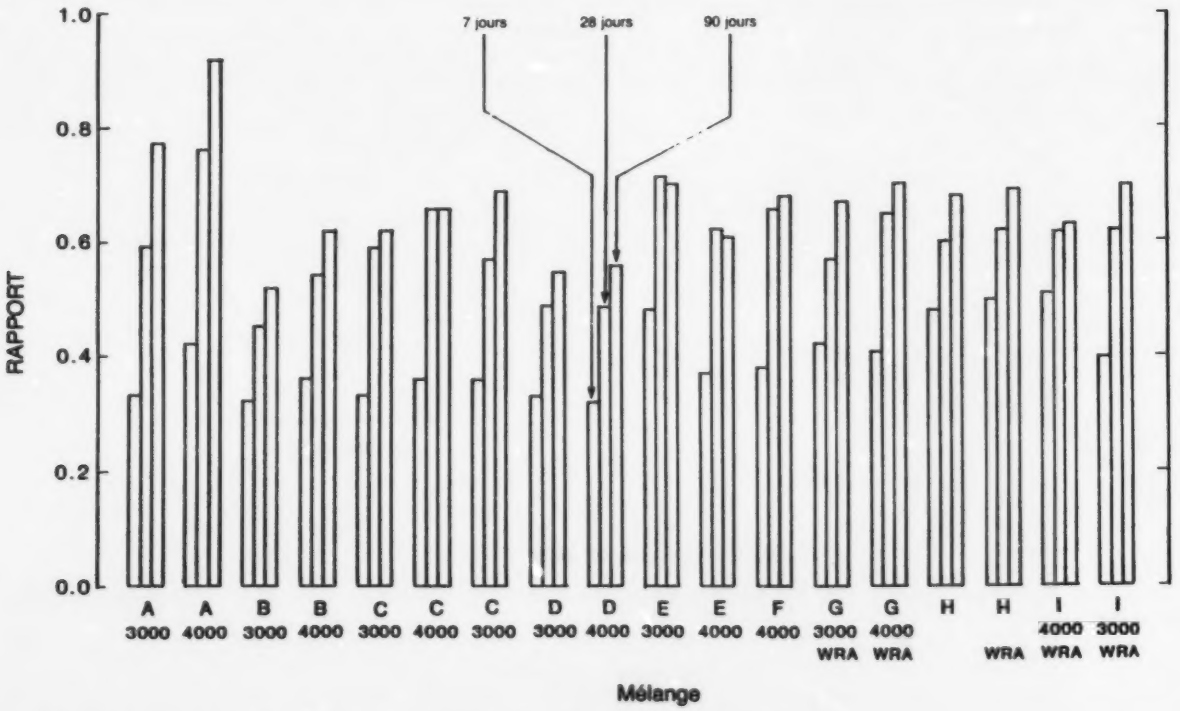


Fig. 16 — Rapports des résistances à la compression de mélanges à béton (21)

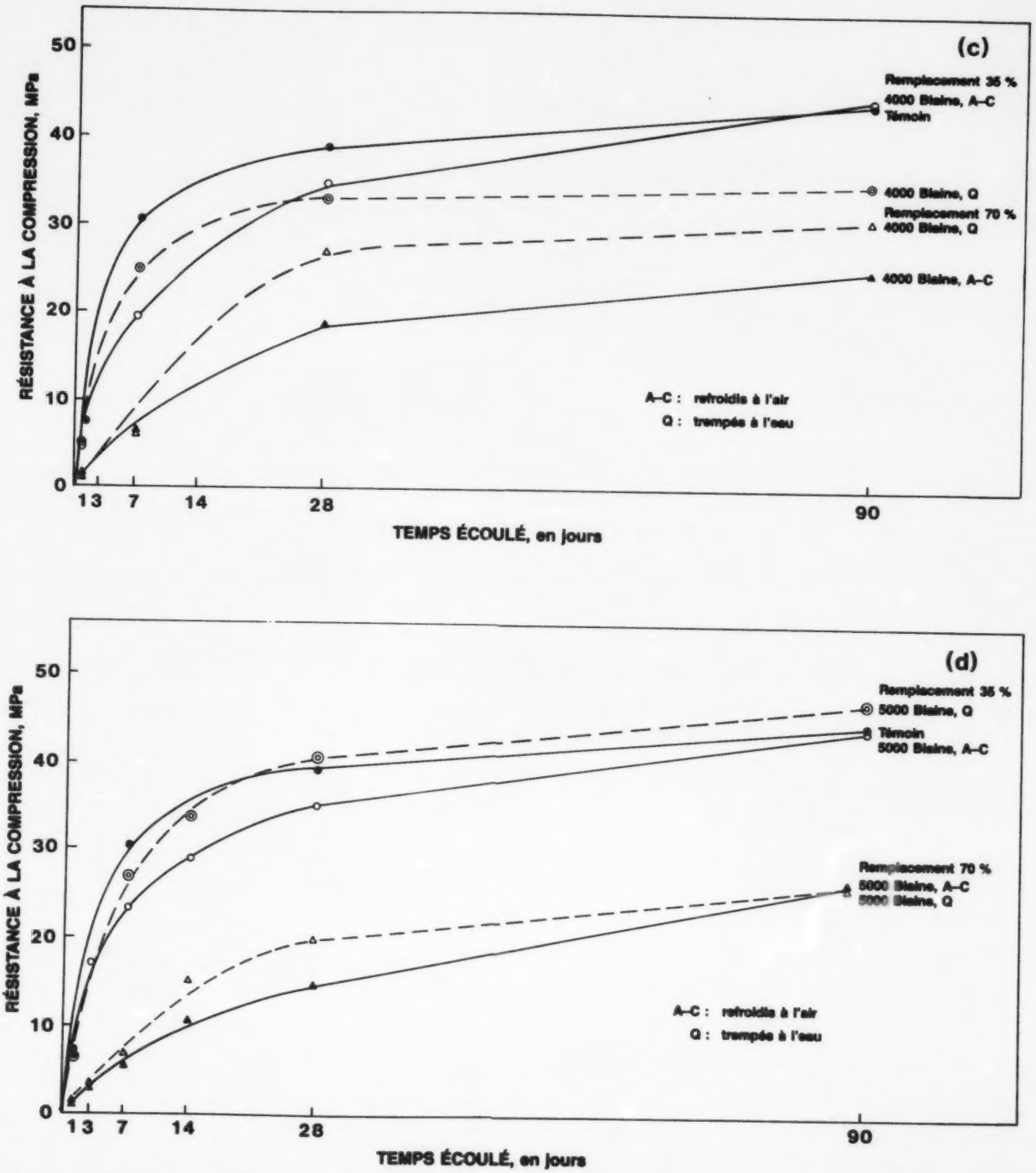


Fig. 17 — Évolution de la résistance de mortiers de ciment portland et de laitiers de cuivre, durcis à la température de la pièce (15)
(c) Laitier broyé à 4 000 cm²/g (méthode Blaine)
(d) Laitier broyé à 5 000 cm²/g (méthode Blaine)

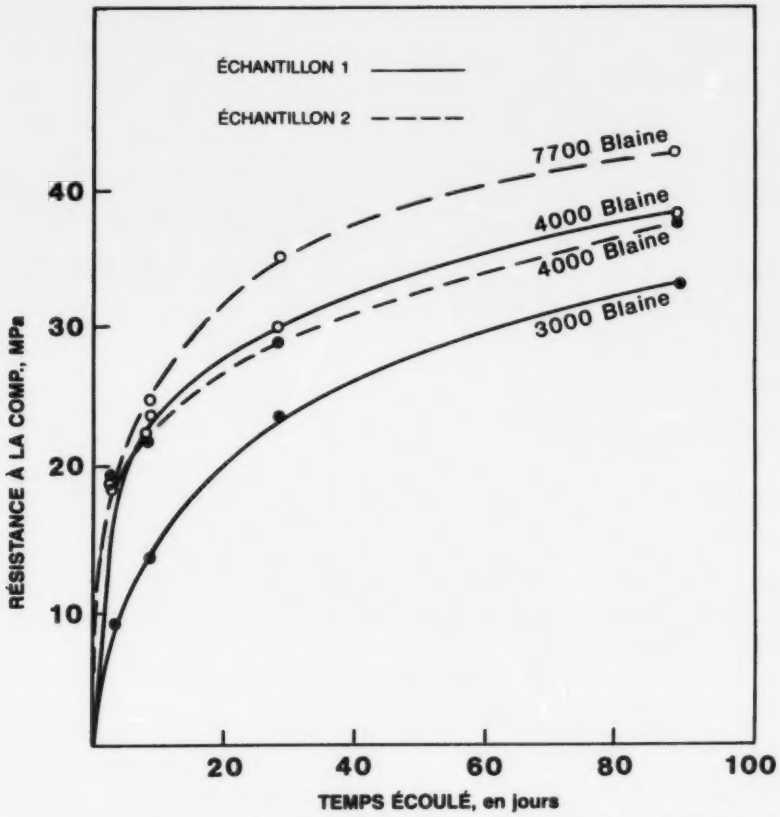


Fig. 18 — Effet de la finesse sur la résistance à la compression de liants (5) constitués de 70 % en poids de ciment portland et de 30 % en poids de laitier de nickel refroidis à l'air (5)

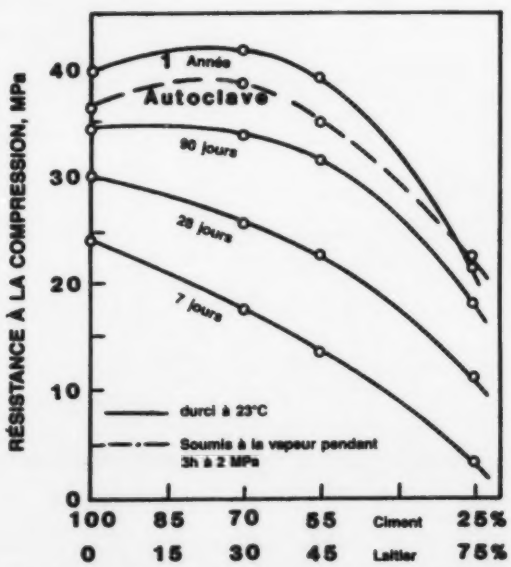


Fig. 19 — Effet de la teneur en laitier des liants sur la résistance à la compression de cubes de mortiers (34)

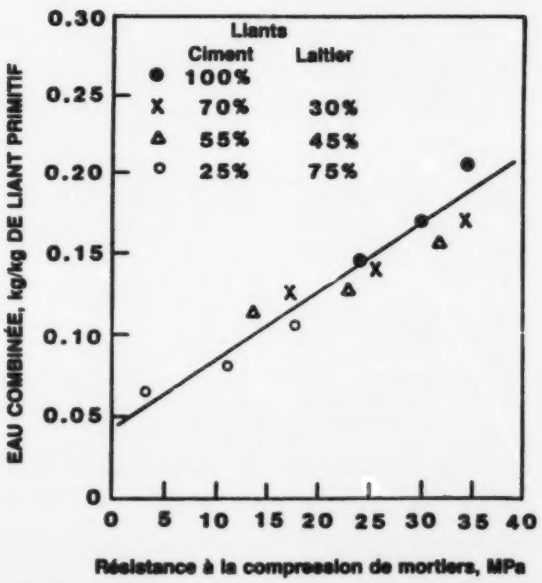


Fig. 20 — Relation entre l'eau combinée et la résistance à la compression (34)

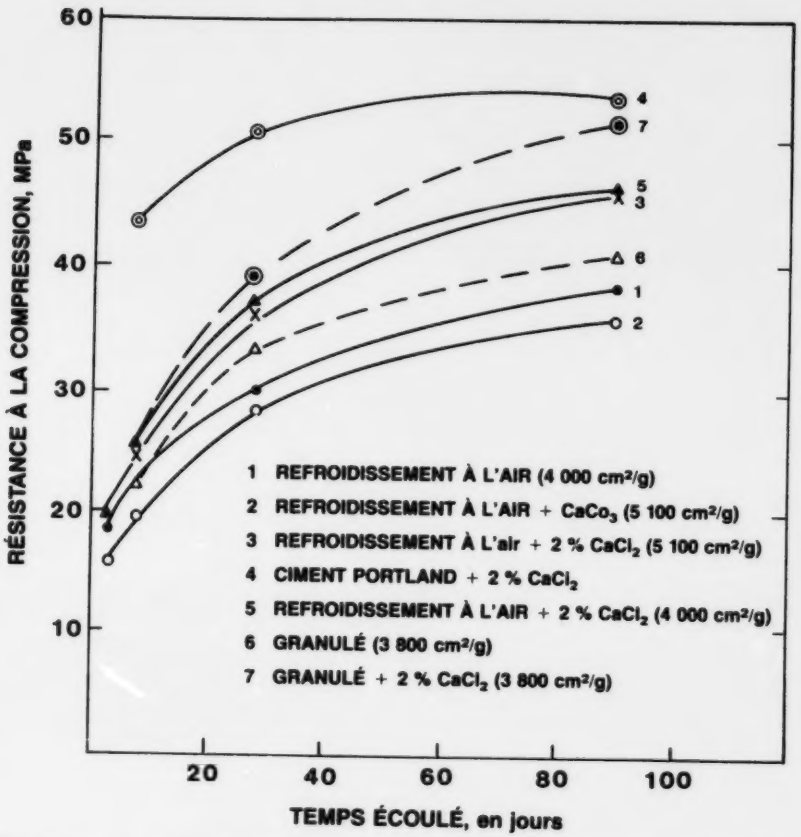


Fig. 21 — Effet d'activateurs sur la résistance à la compression de laitiers de nickel refroidis à l'air et granulés, broyés à divers degrés de finesse (5)